

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Detekce ionizujícího záření pomocí PIN diody
Detection of ionizing radiation using a PIN diode

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Bára Janošcová**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Detekce ionizujícího záření pomocí PIN diody**
Detection of Ionizing Radiation using a PIN Diode

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou měření ionizujícího záření.
2. Teoretický rozbor principu měření pomocí PIN diody.
3. Návrh měření s pomocí PIN diody.
4. Realizace měřicího zařízení s PIN diodou.
5. Měření s vyhodnocením charakteristických dat.
6. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.
[2] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.
[3] CLOSE, F. E. *Částicová fyzika: průvodce pro každého*. Praha: Dokořán, 2008. Průvodce pro každého. ISBN 978-80-7363-160-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Židek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně.

Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

Bára Janošková

Bára Janošková

Datum odevzdání diplomové práce: 30.4.2018

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

.....Ing. Petr Obadal.....

Ing. Petr Obadal

Datum odevzdání diplomové práce: 30.04.2018

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc., za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval. Také bych chtěla poděkovat konzultantovi Ing. Petru Obadalovi ze společnosti Continental Automotiv Czech Republic, s.r.o., za odborné vedení v průběhu vypracovávání celé diplomové práce. Mé díky patří také doc. Dr.RNDr. Petru Alexovi z katedry fyziky, za ochotu a čas, při testování výsledného zařízení.

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout a realizovat zařízení, které bude schopno detekovat ionizující záření. Senzorem pro detekci je křemíková PIN dioda, která vyžaduje nízkou úroveň napájecího napětí, čímž se liší od většiny detektorů. Stěžejní částí systému je kromě vytvořeného hardwaru a programu pro mikrokontrolér softwarová aplikace, která zajišťuje zpracování dat a jejich vizualizaci v grafickém uživatelské rozhraní. Aplikace byla vytvořena v objektově orientovaném programovacím jazyce C#. Výsledek testování vypovídá o správné funkčnosti zařízení pro radioizotopy s nižší hodnotou rozpadové energie. Pro vzorky s vyšší energií, z důvodu malého objemu aktivní vrstvy senzoru, detekce neprobíhala správně.

Klíčová slova

Pin dioda, detektor, ionizující záření, radioizotop

Abstract

The aim of this thesis is to design and assemble a device for detection ionizing radiation. Sensor for detection is silicon PIN diode, which requires low power supply level in comparison with other sensors detecting ionizing radiation. The core of the system is, besides the hardware and microcontroller program, a software application which provides data processing and visualization in the graphical user interface. The application was created using object-oriented programming language C#. The result of testing the detector provides information about correct function of device with radioisotope with lower energy of decay. For samples with higher energy of gamma decay due to small volume of sensor's active layer, the results are incorrect.

Keywords

PIN diode, detector, ionizing radiation, radioisotope

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
Seznam ilustrací.....	10
Seznam tabulek.....	11
1 Úvod	12
2 Struktura atomu a stavební částice látky	13
2.1 Protony	13
2.2 Neutrony	14
2.3 Elektrony	14
3 Subatomární částice	15
3.1 Fermiony.....	15
3.1.1 Kvarky.....	15
3.1.1.1 Mezony	16
3.1.1.2 Baryony.....	16
3.1.1.3 Baryonová hmota	16
3.1.2 Neutrino	16
3.2 Bosony	17
4 Interakce částic	18
4.1 Elektromagnetická interakce.....	18
4.2 Slabá interakce	18
4.3 Silná interakce.....	18
4.4 Gravitační interakce	18
5 Rozpady částic, záření.....	19
5.1 Rozpad α	19
5.2 Rozpad β	19
5.2.1 Rozpad β^-	19
5.2.2 Rozpad β^+	20
5.2.3 Elektronový záchyt.....	21
5.3 Rentgenové záření.....	22
5.3.1 Charakteristické záření	22
5.3.2 Brzdné záření.....	22
5.3.3 Rentgenka	22
5.4 Záření gama	23
5.5 Interakce rentgenového a gama záření s hmotou	23
5.5.1 Fotoelektrický jev	23
5.5.2 Comptonův rozptyl.....	24
5.5.3 Vznik elektron- pozitronového páru.....	24
6 Detekce radiace.....	25
6.1 Elektronické detektory ionizujícího záření	25
6.1.1 Geiger-Müllerův detektor	25
6.1.2 Polovodičové detektory ionizujícího záření	26
7 Teoretický rozbor principů měření pomocí PIN diody.....	27
7.1 Popis PIN diody X100-7	28
8 Návrh měření s pomocí PIN diody	30
8.1 Bloky virtuálního měřicího systému	30

8.1.1	Senzor	30
8.1.2	Obvod pro úpravu signálu	30
8.1.3	A/D převodník	30
8.2	Aplikace návrhu virtuálního měřicího systému pro detektor s PIN diodou	30
9	Realizace měřicího zařízení s PIN diodou	32
9.1	Rodina PIC32 EF	32
9.2	Napájecí obvod	33
9.3	Napájení obvodu PIN diody	34
9.4	D/A převodník a napěťová reference	35
9.5	Zapojení ovládacích prvků	35
9.6	Displej	36
9.7	Zapojení sběrnice USB	37
9.8	Oscilátor	37
9.9	Obvod s PIN diodou	37
10	Výroba a osazení desky plošných spojů	39
11	Architektura programu pro MCU	42
12	SW aplikace pro detektor ionizujícího záření	43
13	Měření s vyhodnocením charakteristických dat	46
13.1	Vyhodnocování detekovaných pulsů	46
13.2	Výsledky měření	48
13.2.1	Stanovení standardní nejistota měření typu A	49
13.2.2	Kvantizační chyba A/D převodníku a stanovení standardní nejistoty měření typu B 50	
13.2.3	Stanovení kombinované standardní nejistoty a rozšířené standardní nejistoty	52
14	Závěr	56
15	Literatura	58
16	Seznam příloh	59
Příloha č. 1 - Schéma detektoru ionizujícího záření		I
Příloha č. 2 - Plošný spoj detektoru		II

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Analogově – digitální
BW	BackgroundWorker
D/A	Digitálně - analogový
DC	Direct current
DPS	Deska plošných spojů
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
HW	Hardware
IDE	Integrated development environment
IZ	Ionizující záření
LCD	Liquid crystal display
LED	Light emitting diode
MCLR	Master Clear or Reset
MCU	Mikrokontrolér
MISO	Master in - slave out
MOSFET	Metal oxid semiconductor field effect transistor
OZ	Operační zesilovač
PC	Personal Computer
PMP	Paraller Master Port
RC	Resistor - Capacitor
RTG	Rentgen, rentgenové
SMT	Surface Mount Technology
SPI	Serial Pheripheral Interface
SW	Software
THT	Through hole technology
UML	Unified Modeling language
USB	Universal Serial Bus

Seznam ilustrací

obr. 1 Vnitřní struktura protonu, znázornění dvou kvarků UP a jednoho kvarku DOWN	13
obr. 2 Vnitřní struktura neutronu, znázornění dvou kvarků typu DOWN a jednoho kvarku UP	14
obr. 3 Beta minus rozpad.....	20
obr. 4 Beta plus rozpad.....	20
obr. 5 Fotoelektrický jev	23
obr. 6 Comptonův jev	24
obr. 7 Vznik elektron-pozitronových párů	24
obr. 8 Schéma Geiger-Müllerova detektoru [2].....	26
obr. 9 Schéma polovodičového detektoru [2].....	26
obr. 10 PIN Dioda X100-7 First Sensor	27
obr. 11 Koncepční konstrukce PIN diody	27
obr. 12 Princip PIN diody [7]	28
obr. 13 Absorbování gama záření při teplotě 23 °C	29
obr. 14 Blokové schéma virtuálního měřicího systému	30
obr. 15 Návrh měřicího řetězce.....	31
obr. 16 Blokové schéma zařízení pro detekci ionizujícího záření	32
obr. 17 Napájecí obvod	33
obr. 18 Napájení MCU.....	34
obr. 19 Zapojení step-up měniče	35
obr. 20 Zapojení D/A převodníku a reference napětí.....	35
obr. 21 Zapojení tlačítek a enkodéru.....	36
obr. 22 Zapojení displeje.....	36
obr. 23 Zapojení USB	37
obr. 24 Zapojení obvodu s PIN diodou	38
obr. 25 Top vrstva.....	39
obr. 27 Třetí vrstva	40
obr. 28 Bottom vrstva	40
obr. 29 Fáze 1 – neosazená DPS, TOP vrstva – levý obrázek, BOTTOM vrstva – pravý obrázek.....	41
obr. 30 Fáze 2 – z části osazená DPS, TOP vrstva – levý obrázek, BOTTOM vrstva – pravý obrázek.....	41
obr. 31 Fáze 3 – kompletně osazená DPS, TOP vrstva.....	41
obr. 32 Vývojový diagram.....	42
obr. 33 Uživatelské rozhraní	43
obr. 34 UML – Use case diagram	44
obr. 35 Diagram tříd	45
obr. 36 Ukázka GUI z průběhu měření.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty elektrického náboje a spinu jednotlivých kvarků [1]	15
Tabulka 2 Seznam měřených radioizotopů	46
Tabulka 3 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Americia 241	53
Tabulka 4 Nejistoty měření pro data radioizotopu Americia 241	54
Tabulka 5 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Stroncium 85	55
Tabulka 6 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Cesium 137	55

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá návrhem a následně i vývojem nízkonapětového zařízení pro detekci ionizujícího záření v průmyslu. Senzorem detekujícím záření je PIN dioda, jejíž charakter umožňuje absorpci gama a beta záření. Motivací této závěrečné práce je vývoj detektoru s nízkou úrovní napájecího napětí, díky které je eliminován elektromagnetický šum, který je generován detektory s potřebou vyššího napájecího napětí.

Nezbytným základem pro řešení takto specifického zadání je teoretický úvod do problematiky jaderné fyziky a fyziky ionizujícího záření. Tato část práce popisuje známé částice, jejich interakce a rozpady. Konkrétně se pak zaměřuje na gama záření a detekci radiace.

Stěžejní částí práce je samotná realizace detektoru, které předchází jeho návrh. Kompletní hardware je navržen na základě parametrů senzoru a vybraného mikrokontroleru. Pro sběr dat a jejich přenos do počítače byl vytvořen firmware pro zvolený MCU v programovacím jazyce C. Samotné zpracování, vyhodnocení a ukládání dat probíhá v počítači prostřednictvím vytvořeného softwaru. Součástí SW aplikace, naprogramované v jazyce C#, je i grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje vizualizaci naměřených dat.

Závěrečná kapitola je věnována analýze dat získaných z testovacích měření, která probíhala v laboratoři jaderné fyziky v areálu planetária Ostrava na Báňské měřičské základně VŠB-TU Ostrava.

Návrh a realizace detektoru se odvíjí od požadavků společnosti Continental Automotive Czech Republic, s.r.o. Průběžné konzultace probíhaly v centru výzkumu a vývoje této společnosti v Ostravě - Hrabové.

2 Struktura atomu a stavební částice látky

Atom je základní stavební jednotka hmoty, která je přímo pozorovatelná a dále chemicky nedělitelná. Jeho velikosti odpovídá 1 angström = 10^{-10} m. Primárně lze atom rozčlenit na hmotnější jádro a lehčí, ale objemnější elektronový obal.

Jádro atomu tvoří nukleony. Ty jsou dále klasifikovány jako kladně nabitě částice nazývané protony a neutrální částice s výsledným nulovým nábojem tzv. neutrony. Velikost jádra atomu a jeho částic je přibližně 1 fm = 10^{-15} m.

Kolem atomového jádra se rychle pohybují, rotují elektrony. Tyto částice se záporným nábojem formují elektronový obal atomu. Elektronový obal lze rozdělit na slupky a podslupky, ve kterých jsou elektrony umístěny. Výskyt elektronu s 95% pravděpodobností vyjadřuje tzv. orbital.

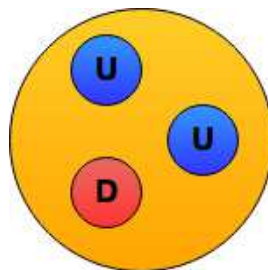
Za běžných podmínek (slabá pole a nízké teploty) atom představuje elektroneutrální systém. Kdy kladně nabitě jádro je vyvažováno záporně nabitým elektronovým obalem. [1, 2, 4]

2.1 Protony

Protony nesou jeden elementární kladný náboj $1\ e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Počet protonů v jádře, který je vyjádřen protonovým číslem, udává celkovou velikost kladného náboje atomu, ale také určuje počet elektronů v elektronovém obalu.

Vnitřní strukturu této částice vytváří trojice kvarků, což je řadí mezi fermiony. Pro protony jsou charakteristické dva kvarky typu UP a jeden kvark typu DOWN, které udávají zmíněný kladný náboj této částice podle vztahu č.1, kdy kvark typu UP nese náboj o hodnotě $+\frac{2}{3}$ a náboj kvarku typu DOWN odpovídá $-\frac{1}{3}$. Protony jsou stabilní částice, tudíž nemůže dojít k jejich přeměně na částice jiného druhu. Hmotnost protonu v klidovém stavu je $1,672622 \cdot 10^{-27}$ kg = 938,26 MeV/c². [1, 2, 4]

$$Q_{p^+} = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1e \quad (1)$$



obr. 1 Vnitřní struktura protonu, znázornění dvou kvarků UP a jednoho kvarku DOWN

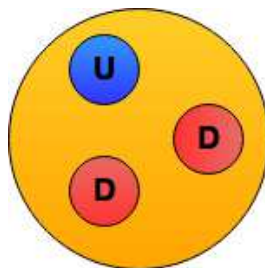
2.2 Neutrony

Tyto elektricky neutrální částice (s výsledným nulovým elektrickým nábojem) jsou stejně jako protony fermiony, tedy složeny z kvarků. Trojice kvarků se skládá z jednoho kvarku typu UP a ze dvou kvarků typu DOWN, které udávají výsledný nulový náboj neutronu. Hmotnost neutronu je rovna $1,6749272 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 939,57 \text{ MeV}/c^2$ a je nepatrně vyšší než hmotnost protonu.

Volný neutron se chová jako nestabilní částice, která se může přeměnit na proton, elektron a antineutrino (rozpad β^-).

Významem neutronu v atomovém jádře je přispívání k celkové hmotnosti jádra a také ke zvýšení účinnosti silné jaderné síly. Pomocí neutronu se jádro atomu stabilizuje. [1, 2, 4]

$$Q_{n^0} = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0 \quad (2)$$



obr. 2 Vnitřní struktura neutronu, znázornění dvou kvarků typu DOWN a jednoho kvarku UP

2.3 Elektrony

Na rozdíl od kladných protonů jsou elektrony částice s jedním záporným elementárním nábojem $1 e^- = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a bez vnitřní struktury, a tak jsou považovány za skutečně elementární částice, které nelze dále rozčlenit. Záporně orientovaný náboj umožňuje elektronům, pomocí přitažlivé síly opačných nábojů, obíhat kladně nabitě atomové jádro.

Elektrony patří do skupiny fermionů, konkrétně leptonů. Hmotnost této elementární částice je mnohem nižší než hmotnost nukleonů a je rovna $9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 511 \text{ keV}/c^2$. Hmotnost elektronu je stejná jako hmotnost jeho antičástice pozitronu, která se liší pouze svým opačným nábojem. Energie elektronů se zvyšuje se vzdáleností od atomového jádra. [1, 2, 4]

3 Subatomární částice

Částice mohou být rozděleny do různých skupin na základě různých parametrů. Částice se dělí např. podle spinu¹ a tedy podle statistického chování nebo podle rodové příslušnosti. První kritérium rozděluje částice na fermiony a bosony. Podle druhé podmínky jsou částice rozděleny na kvarky, leptony a intermediální a Higgsovy částice.

3.1 Fermiony

Fermiony jsou částice s poločíselným spinem vyjádřeným pomocí Planckovy konstanty. První skupinou jsou fundamentální leptony, které nejsou ovlivňovány jadernou silou a patří mezi ně například elektron, neutrino, mion a tauon². Druhá skupina fermionů je složena z kvarků, jenž některé z nich (kvarky UP a DOWN) vytvářejí vnitřní strukturu protonů a neutronů.

U fermionů platí Pauliho vylučovací princip, který udává, že žádné dvě částice nemohou být umístěny ve stejném kvantovém stavu. [1, 2, 4]

3.1.1 Kvarky

Elektrony spolu s kvarky představují elementární stavební částice veškeré hmoty (pro rok 2017). Celkem existuje 6 druhů kvarků, které jsou na základě hmotnosti rozděleny do tří rodin (generací).

Vzápětí vzniku Vesmíru byly nestabilní kvarky strange, charm, bottom a top přeměněny slabou jadernou silou na již stabilní subnukleární částice kvarky UP a DOWN, které tvoří vnitřní, elementární strukturu nukleonů.

Hmotnost jednoho kvarku je přibližně $10 \times$ větší, než hmotnost elektronu. Ve trojicích, ve kterých tvoří vnitřní strukturu neutronu nebo protonu je jejich hmotnost zhruba 1 GeV. Základní vlastnosti kvarků jsou zaznamenány v tabulce č.1. [4]

Tabulka 1 Hodnoty elektrického náboje a spinu jednotlivých kvarků [1]

	1. Rodina		2. Rodina		3. Rodina	
kvark	down	up	strange	charm	bottom	top
elektrický náboj	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
hmotnost	5 MeV	3 MeV	95 MeV	1,3 GeV	4,2 GeV	173 GeV

Kvarky jsou dále členěny na mezony, které jsou tvořeny jedním kvarkem a jedním antikvarkem a baryony, které se skládají z trojice kvarků.

¹ Spin – vlastní moment hybnosti částice v násobcích Planckovy konstanty $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

² Mion a tauon – nestabilní částice, které vymizely vlivem působení slabé jaderné síly

3.1.1.1 Mezony

Mezony jsou děleny na skalární a vektorové. Skalární mezony jsou představovány kvarky, které mají protichůdný směr spinu, a proto je celkový spin skalárních mezonů nulový (π mezony). Vektorové mezony tvoří kvarky se stejně orientovaným spinem, proto je výsledný spin tohoto mezonu roven 1 (ρ mezony).

3.1.1.2 Baryony

Baryony jsou těžké částice skládající se ze tří kvarků. Tyto trojice mohou být kombinované tak, aby jejich výsledný spin odpovídal hodnotě $\frac{1}{2}$ (nukleony) nebo $\frac{3}{2}$ (Δ baryony).

Nukleony jsou považovány za lehčí baryony, naopak těžkými baryony jsou hyperony. Hyperony jsou částice, které ve své struktuře obsahují podivný kvark a existuje několik typů (Λ hyperon, Σ hyperony, Ξ hyperony a Ω hyperon).

3.1.1.3 Baryonová hmota

Normální (baryonová) hmota tvoří 4% hmoty ve Vesmíru. Baryonovou hmotu tvoří 2% hmoty svítící a 2% hmoty temné (MACHO, chladná vodíková oblaka). Tato hmota má mnohem menší kinetickou energii, než je její potenciální energie, a proto je považována za hmotu nerelativistickou³.

Součástí baryonové hmoty jsou kromě baryonů také podle některých astronomů elektrony, které patří do skupiny leptonů, a to proto, že Vesmír je celkově neutrální, tedy pro každý proton musí existovat elektron. Elektrony jsou v baryonové hmotě zohledňovány pro jejich velmi malou hmotnost, která je oproti hmotnosti nukleonů zanedbatelná.

3.1.2 Neutrína

Tyto velmi lehké částice bez elektrického náboje jsou zařazeny do skupiny leptonů a každý jeden typ reprezentuje jednu ze tří rodin. Do první rodiny společně s elektronem e^- patří také elektronové neutrino ν_e . Elektronové neutrino se vyskytuje při $\beta \pm$ rozpadu. Druhá rodina leptonů zahrnuje mion m^- a mionové neutrino ν_μ . a třetí rodina obsahuje tauon τ^- a tauonové neutrino ν_τ . Mionové a tauonové neutrína vznikají při rozpadu mionu a tauonu.

Neutrína vznikají i v různých interakcích, například při termojaderných reakcích ve hvězdách nebo při výbuchu supernovy a jsou zároveň s fotony nejvyskytovanějšími částicemi ve Vesmíru.

Interakce neutrin je velmi slabá a dosahuje jen velice krátkých vzdáleností. Díky těmto vlastnostem jsou neutrína schopna volně prolétat hmotou a jejich zachycení je obtížné.

³ Nerelativistický děj – děj, ve kterém jsou všechny rychlosti nižší než rychlost světla.

3.2 Bosony

Jsou částice s celočíselný spinem a na rozdíl od fermionů nesplňují Pauliho vylučovací princip, ale podléhají tzv. Boseově-Einsteinové statistice. Tato statistika udává, že se v jednom kvantovém stavu může nacházet neomezené množství částic. Podle velikosti spinu jsou rozlišovány skalární bosony ($\text{spin} = 0$) a vektorové bosony ($\text{spin} = 1$). Bosony jsou také zprostředkovatelé jednotlivých interakcí, a proto jsou nazývány intermediálními částicemi.

Mezi bosony řadíme foton ($\text{spin} = 1$), π -mezony ($\text{spin} = 0$), bosony W^- , W^+ , Z ($\text{spin} = 0$), gluony ($\text{spin} = 1$) a hypotetické gravitony ($\text{spin} = 2$). [1, 2, 4]

4 Interakce částic

Interakce jsou děleny na interakci elektromagnetickou, slabou, silnou a gravitační. Interakce je zprostředkována intermediálními částicemi, které obklopují danou částici podléhající určité interakci. Jednotlivé interakce mohou působit jen na určité druhy částic a jejich působení je ovlivněno jejich dosahem.

4.1 Elektromagnetická interakce

Elektromagnetická interakce působí jako síla pouze mezi elektricky nabitými částicemi. Elektrické síly rozdělujeme na přitažlivé, reprezentované protonem a odpudivé, jejichž zástupcem je elektron. Opačně nabitě částice se navzájem přitahují, zato částice se stejným nábojem se odpuzují. Díky těmto silám, je zajištěna soudružnost atomu i vázání atomů v molekulách. Kolem částice s nábojem se vyskytuje elektromagnetické pole, které pomocí fotonů elektromagnetickou interakci zajišťuje. Elektromagnetická interakce působí i na velké vzdálenosti (je nekonečná).

4.2 Slabá interakce

Slabá interakce má vliv na hadrony i leptony a způsobuje pomalý rozpad částic (např. β rozpad). Tuto sílu s krátkým dosahem (přibližně 10^{-17} m) zprostředkovávají bosony W^+ , W^- a Z .

4.3 Silná interakce

Pomocí této nejsilnější interakce, která je zprostředkována osmi gluony, jsou drženy pohromadě protony a neutrony v atomovém jádře. Mimo to také spojuje kvarky v hadrony (částice s vnitřní strukturou tvořenou dvěma či třemi kvarky) a způsobuje některé rozpady fundamentálních částic. Jedná se o interakci s krátkým dosahem asi 10^{-15} .

4.4 Gravitační interakce

Tato interakce s neomezeným dosahem působí na všechny částice. Díky této síle je zajištěna struktura celého Vesmíru. Jedná se o sílu s nejslabší účinností, ale její síla se může být mnohonásobně zvětšena díky jejím kumulativním vlastnostem. Teorie v roce 2017 udává, že každá částice je obklopena hypotetickými částicemi nazývanými gravitony, které gravitaci zprostředkovávají. [1, 2, 4]

5 Rozpady částic, záření

5.1 Rozpad α

Přeměna alfa nastává u těžkých přirozených radionuklidů při spontánní emisi těžkého jádra helia - částice α z radioaktivního jádra atomu (z mateřského jádra je emitována dvojice protonů a dvojice neutronů). Protonové číslo dceřiného jádra je pak o dvě nižší než je protonové číslo mateřského jádra a nukleonové číslo je sníženo o čtyři. Jako příklad je uveden rozpad Radia²²⁶ na Radon²²².



5.2 Rozpad β

Rozpad typu beta, je možno rozdělit do dvou skupin podle emitované částice na rozpad β^- a rozpad β^+ . Spektrum e^\pm těchto dvou rozpadů je spojitě. Třetím druhem rozpadu beta je elektronový záchyt, který vytváří alternativu k rozpadu beta plus. Rozpad beta je podmíněn slabou jadernou interakcí. Výsledkem rozpadu částic je radioaktivita nesoucí stejné názvy jako jednotlivé rozpady.

5.2.1 Rozpad β^-

Radioaktivita β^- – vzniká u atomových jader s přebytkem neutronů. Při rozpadu typu beta - vzniká záření beta -, což je proud záporně nabitých elektronů, které jsou emitované jádrem atomu s energií 10 MeV a jejich rychlost se přibližuje rychlosti světla ($3 \cdot 10^8$ m/s). Pro to, aby mohlo dojít k radioaktivitě typu beta – je nutné dodržení hmotnostně-energetické podmínky:

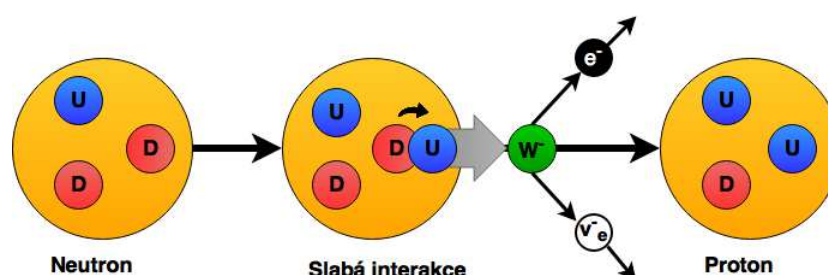
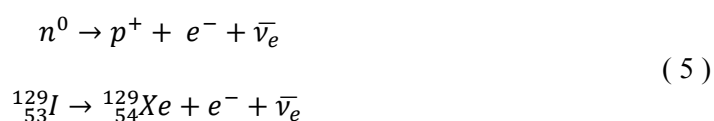
$$m(Z+1, N) + m_e < m(Z, N) \quad (4)$$

- $m(Z, N)$ je hmotnost jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem N
- m_e je klidová hmotnost elektronu

Při rozpadu β^- – dochází k rozpadu neutronu na proton, a to tak, že se jeden kvark typu DOWN přemění na kvark typu UP. Vlivem rozdílných nábojů těchto dvou kvarků vzniká i na velmi krátkou dobu virtuální⁴ záporně nabitá částice W^- boson s velmi vysokou energií. Tento W^- boson se okamžitě rozpadá na elektron e^- a elektronové antineutrino $\bar{\nu}_e$, které jsou emitovány do prostoru.

⁴ Virtuální částice-částice s velmi vysokou energií, které vznikají při rozpadech nebo anihilacích a okamžitě zanikají rozpadem na další částice s nižší energií

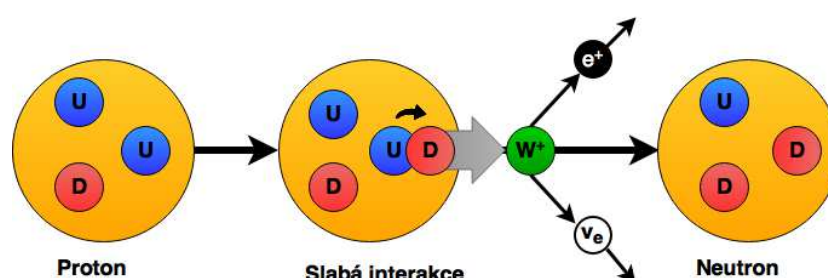
Přeměnou neutronu na proton se zvýší protonové číslo o 1, přičemž velikost nukleonového čísla zůstává neměnná. Poločas rozpadu neutronu je 14,7 min.



obr. 3 Beta minus rozpad

5.2.2 Rozpad β^+

K rozpadu β^+ dochází při převaze kladných protonů v jádře atomů. Namísto emitování elektronů, jak tomu je u β^- rozpadu, je vyzářenou částicí neutrino a antičástice elektronu, kladně nabitý pozitron e^+ . Samozřejmě vzniká při přeměně protonu na neutron kladně nabitý boson W^+ , který se poté ihned rozpadá na zmíněné emitované částice. Příkladem beta plus rozpadu je rozpad uhlíku na bór.



obr. 4 Beta plus rozpad

Při rozpadu β^+ se nukleonové číslo nemění, ale protonové číslo je sníženo o 1. Pro vznik radioaktivity β^+ musí být splněna hmotnostně-energetická podmínka:

$$m(Z-1, N) + 2m_e < m(Z, N) \quad (7)$$

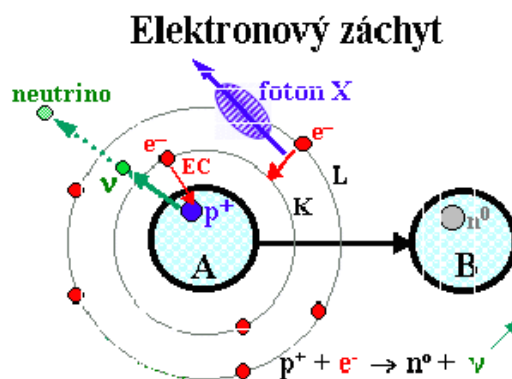
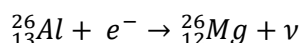
- $m(Z, N)$ je hmotnost jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem N
- m_e je klidová hmotnost elektronu shodná s klidovou hmotností pozitronu

Beta plus rozpad se využívá hojně při pozitronové emisní tomografii (PET). Tato lékařská zobrazovací metoda využívá anihilaci emitovaných pozitronů a elektronů, během které vznikají dva fotony, které jsou následně detekovány a vzniká tak obraz příčného řezu vyšetřované oblasti.

5.2.3 Elektronový záchyt

Elektronový záchyt může být pokládán za variantu rozpadu beta plus (také vzniká při nadbytku protonů v atomovém jádře), u těžších atomových jader elektronový záchyt převažuje nad rozpadem β^+ . Rozdílem je docílení rozpadu kladného protonu na neutron. Tomu je dosaženo pomocí zachycení elektronu z elektronového obalu atomovým jádrem a sloučením s protonem.

$$p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu \quad (8)$$



obr. 1 Elektronový záchyt [2]

Při elektronovém záchytu dochází k emisi pouze neutrin, nikoliv k vyzáření korpuskulárního záření jako u rozpadu β^+ a β^- .

Zachycený elektron se nachází většinou v elektronové slupce K, nacházející se nejbližší k jádru, avšak záchyt elektronu může proběhnout i ze vzdálenějších slupek L a M. Zachycená záporně nabitá částice je okamžitě nahrazena elektronem ze slupky s vyšší energetickou hodnotou vznik, a tak dochází k vyzáření rentgenového záření.

5.3 Rentgenové záření

Rentgenové záření je forma elektromagnetického záření s vlnovou délkou 10^{-12} až 10^{-8} m. Energie fotonů se pohybuje mezi 1 až 200 keV. Přírodními zdroji x-záření jsou hvězdy, uměle rentgenové záření vzniká v tzv. rentgence. Rentgenové záření má schopnost ionizace, tedy procesu, kdy jsou fotony pomocí dostatečně vysoké energie vytvořit z neutrálně nabitých molekul či atomů elektricky nabitých částic (ionty).

Toto záření má uplatnění v zobrazovacích metodách, především v lékařství. Jako zobrazovací metoda se využívá pro jeho schopnost pronikat různými materiály, i těmi, které jsou světelně nepropustné. Využití nalézá i v průmyslu, např. v detekci vad materiálu, výroba polovodičových součástek.

Na základě vlnové délky je RTG záření rozděleno na měkké záření a tvrdé záření. Měkké záření má větší vlnovou délku, tím pádem se šíří s nižší frekvencí a je málo prostupné ozařovaným materiálem. Oproti měkkému záření je tvrdé záření velmi pronikavé díky své vysoké frekvenci a krátkým vlnovým délkám.

Rentgenové záření je rozděleno na charakteristické a brzděné záření.

5.3.1 Charakteristické záření

Prvním typem, je charakteristické záření, které vzniká při přesunu elektronů mezi K, L slupkami v elektronovém obalu u těžších atomů. Dopadající elektron vyrazí elektron z některé z vnitřních slupek atomu materiálu anody, který je poté okamžitě nahrazen elektronem z některé z vnějších slupek. Během přesunu elektronu z vnější slupky na místo vyzářeného elektronu dochází k vyzáření fotonu s energií rovnou rozdílu energií mezi slupkami. Spektrum charakteristického záření je diskrétní.

5.3.2 Brzděné záření

Druhý typ se nazývá brzděné záření a vzniká v rentgence při brzdění a dopadu elektronů na anodu, a tím se jejich kinetická energie přemění na elektromagnetické záření - fotony o různých vlnových délkách, či energii. Energie vyzářených fotonů závisí na rychlosti elektronů a jejich hloubce dopadu na materiál anody).

5.3.3 Rentgenka

Rentgenka je speciální vakuová elektronka, pomocí které vzniká umělé x-záření. Součástí rentgenky je anoda, která je většinou vyrobena z wolframu, a katoda. Žhavená katoda emituje elektrony, které jsou následně urychlovány vysokým napětím (20-200 kV) mezi záporně nabitou katodou a kladnou anodou. Tyto elektrony jsou dále usměrňovány do jednoho bodu anody pomocí Wehneltového válce, která musí být chlazená (na základě chlazení je rozlišováno několik typů rentgenek). Při dopadu elektronu na anodu je vyzařováno elektromagnetické záření, které se z 99% mění na teplo a zbývající 1% se mění na rentgenové záření vystupující z anody. [3]

5.4 Záření gama

Gama záření společně s rentgenovým zářením mají stejné fyzikální vlastnosti, rozdíl je ve velikosti vlnové délky, která je u elektromagnetického gama záření velmi krátká. (10^{-11} až 10^{-13} m). Kvůli krátké vlnové délce má toto záření vysokou energii a velkou pronikavost do ozařovaných materiálů.

Rozdíl mezi rentgenovým a gama zářením spočívá v jejich vzniku. Gama záření oproti RTG záření, která vzniká v atomovém obalu, má původ v jádře atomu. Gama záření je doprovázeno alfa nebo beta zářením při radioaktivním rozpadu jader. Při vyzáření alfa nebo beta částic se může jádro dostat do excitovaného stavu, a aby došlo k přeměně jádra do základního stavu musí být deexcitované. Tato deexcitace probíhá pomocí vyzáření vysokoenergetického fotonu - gama záření.

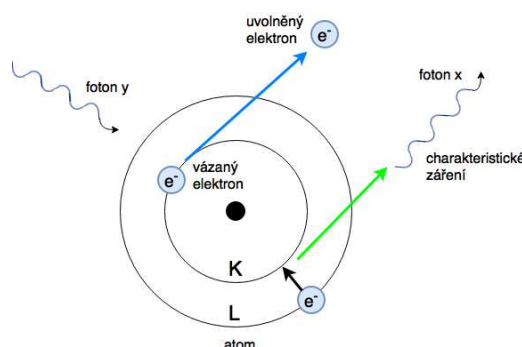
5.5 Interakce rentgenového a gama záření s hmotou

Interakce s hmotou těchto dvou záření může proběhnout následujícím třemi způsoby. (v textu jsou interakce popsány s gama zářením, avšak interakce hmoty s rentgenovým zářením probíhá analogicky).

5.5.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev se vyskytuje především u fotonů s nižší hodnotou energie a u prvků s vysokým protonovým číslem. Při ozaření dané hmoty gama zářením, předá foton svou veškerou energii elektronu v elektronovém obalu a zaniká. Část této energie vynaloží elektron k uvolnění z atomu (k tzv. výstupní práci) a stává se z něj fotoelektron. Zbytek energie je přeměněn na kinetickou energii fotoelektronu. Tento fotoelektron pak dále ionizuje své okolí a je nahrazen elektronem ze vzdálenější slupky od jádra atomu s vyšší energií přičemž dochází k vyzáření fotonu.

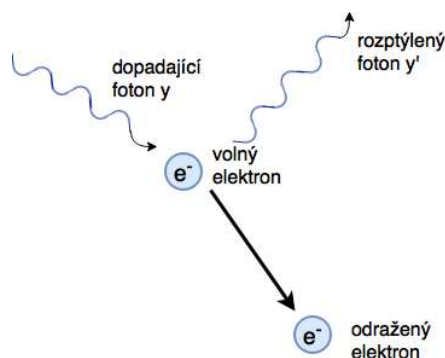
Fotoelektrický jev je rozlišen na vnitřní a vnější. Vnější fotoelektrický jev probíhá na povrchu ozařovaného materiálu, kdy jsou elektrony vyzařovány do okolí. Při vnitřním fotoelektrickém jevu uvolněné elektrony neopouštějí atom, čímž zlepšují elektrickou vodivost ozařované látky. Vnějšího fotoelektrického jevu je využito u polovodičových součástek jako je např. fotodioda.



obr. 5 Fotoelektrický jev

5.5.2 Comptonův rozptyl

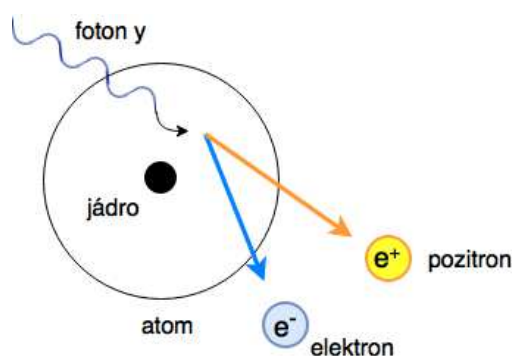
Nastává při srážce fotonu gama záření s volným nebo s velmi slabě vázaným elektronem. Při srážce elektronu předá foton pouze část své energie, nezaniká, ale dochází k jeho odrazu od dané částice. Odražený foton se sníženou energií změní směr své trajektorie, a tak může působit na další elektrony, dokud neztratí dostatečné množství energie a nezaniká tak fotoelektrickým jevem, nebo neopustí ozařovanou látku. Elektron je touto srážkou urychlen, vyražen z atomu a dále ionizuje své okolí.



obr. 6 Comptonův jev

5.5.3 Vznik elektron- pozitronového páru

Tento děj probíhá u látek s vysokým protonovým číslem a při vysokých energiích gama záření. Vlivem elektromagnetické síly atomového jádra nebo jiné částice, kolem které fotony prolétávají je foton přeměněn na elektron a pozitron. Tyto částice ztrácejí postupně svou kinetickou energii. Pozitron dále anihiluje, přičemž vznikají dvě kvanta záření o energii 511 keV s opačným směrem pohybu.



obr. 7 Vznik elektron-pozitronových párů

6 Detekce radiace

Detektory jsou rozděleny do tří základních kategorií, které jsou rozděleny na další skupiny a podskupiny detektorů. Základní rozdělení detektorů podle:

1. Principu detekce ionizujícího záření
 - Fotografické detektory
 - Materiálové detektory
 - Elektronické detektory
2. Časového průběhu detekce ionizujícího záření
 - Kontinuální detektory
 - Kumulativní (integrální) detektory
3. Komplexnosti měřeného ionizujícího záření
 - Detektory záření
 - Spektrometry ionizujícího záření
 - Zobrazovací detektory
 - Dráhové detektory částic

6.1 Elektronické detektory ionizujícího záření

Principem elektronických detektorů je přeměna části absorbované energie ionizujícího záření na elektrické proudy nebo impulsy, které jsou následně zesilovány a dále zpracovávány. Tyto detektory mohou pracovat buď v proudovém nebo pulsním režimu. Mezi elektronické detektory ionizujícího záření jsou zařazeny např. polovodičové detektory a Geiger-Müllerův detektor.

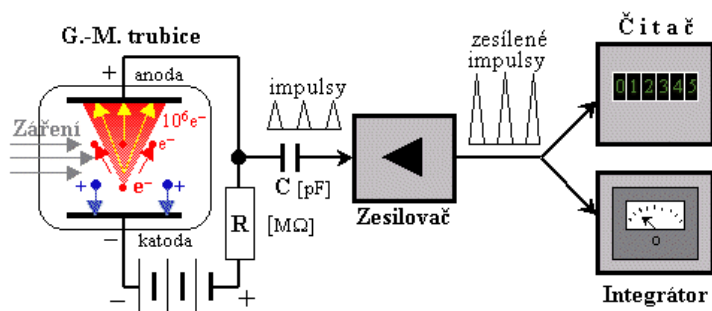
6.1.1 Geiger-Müllerův detektor

Geiger-Müllerův počítač je plynová ionizační komora, která pracuje v impulsním režimu a umožňuje detekci jednotlivých částic.

Základní částí je Geigerova-Müllerova trubice naplněná inertním plynem (helium, argon, neon) s nižším tlakem než je tlak atmosférický a je hermeticky uzavřena. Stěny trubice představují katodu, která je napojena na zdroj vysokého napětí. Uvnitř trubice je umístěna anoda z tenkého drátu.

Po vstupu částice do trubice dochází k ionizaci plynu a kladné ionty se začnou pohybovat ke katodě a záporné elektrony k anodě. Díky vysokému napětí a zředěnému plynu jsou elektrony urychlovány (získávají vysokou kinetickou energii) což způsobuje při srážce s atomem plynu ionizaci, tedy vyražení sekundárních elektronů a iontů. Tento děj je lavinový (z primárního

elektronu může vzniknout až 10^{10} sekundárních elektronů). Lavinová ionizace způsobuje výboj mezi anodou a katodou, který je nutno co nejrychleji přerušit. Přerušeni probíhá díky úbytku napětí na rezistoru a pomocí zhasací látky, která je přidávána do plynné směsi. Ještě před přerušením tento výboj mezi elektrodami vyvolá vysoký napěťový impuls na rezistoru, který je registrován vhodným elektronickým zařízením, a tak je docíleno detekce kvanta ionizujícího záření.

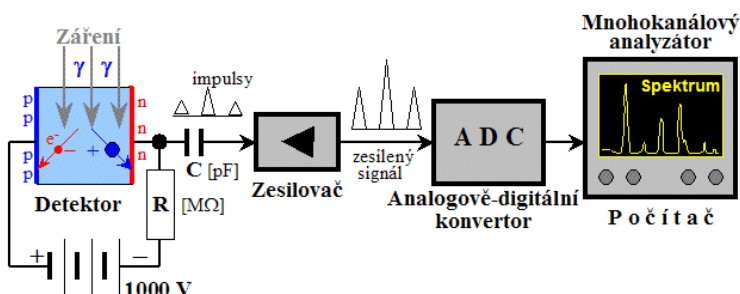


obr. 8 Schéma Geiger-Müllerova detektoru [2]

6.1.2 Polovodičové detektory ionizujícího záření

Principem polovodičových detektorů je vznik párů elektron – díra. Při vstupu ionizujícího záření do aktivní vrstvy (oblast bez volných nosičů náboje - bez elektronů a děr), která je vytvořena p-n přechodem, dojde k přesunu elektronů do vodivého pásma, a tak je uskutečněn vznik elektron - děrových párů. Přiloženým napětím vzniká elektrické pole, které způsobí pohyb vzniklých děr k anodě a elektronů k záporně nabitě elektrodě (katodě). Tím je vyvolán krátký proudový impuls a úbytek napětí na rezistoru. Poté je elektrický impuls přiveden přes kondenzátor na zesilovač. Získaná amplituda impulsů je pak přímo úměrná energii detekovaného ionizujícího záření, tedy energii, která byla absorbována aktivní vrstvou polovodičového detektoru při průletu částic ionizujícího záření.

[2]



obr. 9 Schéma polovodičového detektoru [2]

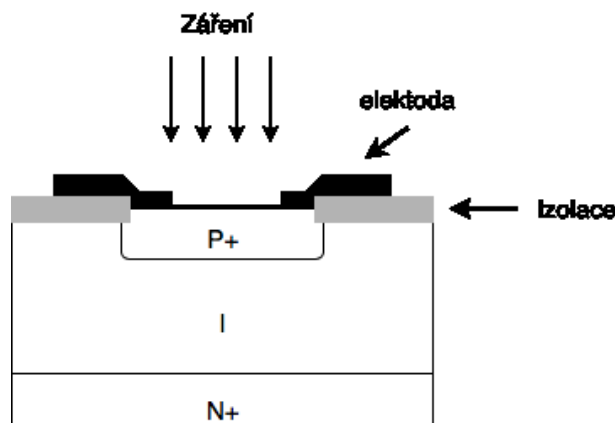
7 Teoretický rozbor principů měření pomocí PIN diody

Detektory ionizujícího záření s PIN diodou patří mezi polovodičové detektory. Nejčastěji jsou zhotoveny z monokrystalů germania nebo křemíku s malou příměsí lithia. Výhodou germaniové PIN diody je velikost citlivé oblasti, která může být až 100 cm², ale protože je zapotřebí pro provoz i uskladnění germaniové diody velmi nízká teplota (cca -196 °C), je v této práci použita a dále popisována dioda křemíková, která je vhodná k použití při teplotách -20 až +70 °C. Čím nižší je teplota okolí, tím nižší je velikost šumu.



obr. 10 PIN Dioda X100-7 First Sensor

PIN dioda se skládá celkově ze tří vrstev. Silně dotované vrstvy⁵ P a N jsou charakteristické svou vysokou vodivostí. Třetí vrstva I (intrinsická), která se nachází mezi vrstvou P a N je mnohem méně dotovaná a naopak se projevuje velmi malou vlastní vodivostí. Měrný odpor silně dotovaných vrstev je mnohonásobně menší než měrný odpor slabě dotované oblasti.

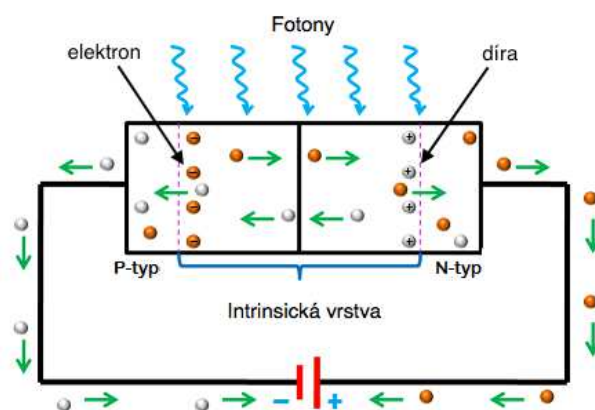


obr. 11 Konceptní konstrukce PIN diody

PIN dioda je pro účely detekce zapojena v obvodu v závěrném směru. To způsobuje, že dochází uvnitř diody k rozšiřování ochuzené (depleční) oblasti a tím klesá její kapacita. Čím širší je ochuzená vrstva, tím je větší pravděpodobnost, že ji zasáhne ionizující částice a dojde k interakci (Comptonovu nebo fotoelektrickému jevu). Stejně jako u ostatních polovodičových detektorů

⁵ Dotované vrstvy - vrstvy, do kterých je přidávána nepatrná část nějaké příměsí, která způsobí polovodivost daného materiálu

dochází při interakci záření s diodou ke generování párů elektron – díra. Kladně nabitá díra je poté vzniklým elektrickým polem přitahována zápornou elektrodou a naopak záporně nabitý elektron se snaží dostat ke kladné elektrodě. Na základě tohoto pohybu vzniká děrový proud I_d a elektronový proud I_e . Součtem těchto dvou proudů získáváme výsledný proud I , který je možno detekovat a změřit amplitudu impulsu způsobeného zachycenou částicí. [5, 6, 7]



obr. 12 Princip PIN diody [7]

7.1 Popis PIN diody X100-7

PIN dioda X100-7 pro povrchovou montáž je tvořena aktivní oblastí o velikosti 100 mm². PIN dioda má nehermetické keramické pouzdro s černým epoxidovým zapouzdřením, které zabráňuje průchodu světla.

Parametry PIN diody X100-7:

- Teplota skladování – 40 °C až 100 °C
- Provozní teplota -20 °C až 70 °C
- Maximální závěrné napětí $V_{max} = 50$ V
- Detekce záření s energií 5 až 1000 keV při teplotě 23 °C

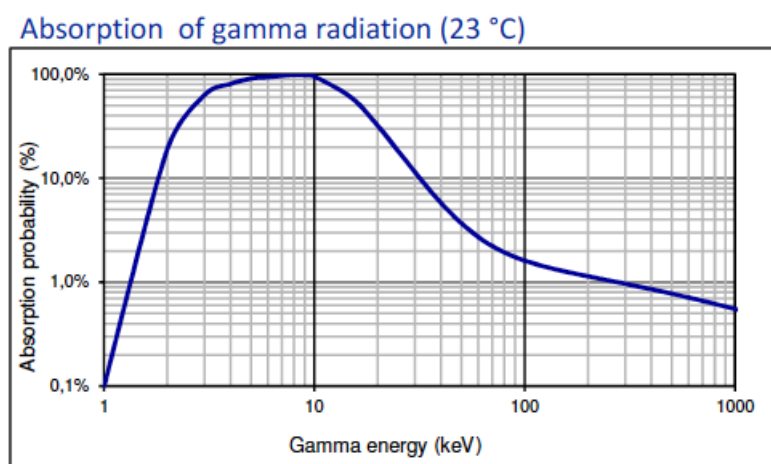
Absorpce záření je zobrazena na obr. 13. Pravděpodobnost absorbování gama záření je v logaritmickém měřítku nejvyšší při jeho energii mezi 5 až 10 keV, poté logaritmicky klesá se zvyšující se energií.

Využití této diody nalézá v lékařských přístrojích, také je vhodná pro měření ionizujícího záření a může být použita i jako osobní dozimetr.

Vlastnosti:

- Aktivní oblast 10 x 10 mm
- Zapouzdření blokující světlo
- Průsakový/únikový proud (dark current), vlivem nehomogenity, vady materiálu
- Nízká kapacita
- Vysoká zkratová odolnost
- Vysoká citlivost

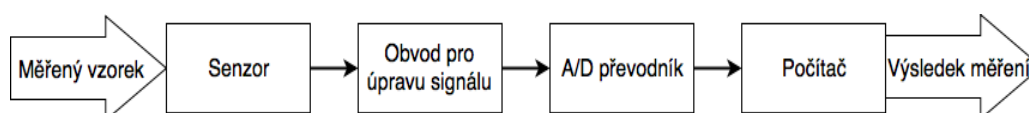
Na obrázku č. 13 je zobrazena absorpce gama záření při teplotě 23 °C.



obr. 13 Absorbování gama záření při teplotě 23 °C

8 Návrh měření s pomocí PIN diody

Návrh celého měřicího systému pro detekci ionizujícího záření vychází ze základního blokového schématu měřicího řetězce virtuálního měřicího systému. Stěžejní prvkem je v takovém zařízení počítač, pro který je implementován software. Softwarová aplikace pak obstarává veškeré zpracování a případnou vizualizaci naměřených dat. Hardware naopak takovou funkci nemá a zajišťuje pouze snímání měřené veličiny, eventuálně úpravu získaného signálu a převedení signálu do číslcové podoby. [11]



obr. 14 Blokové schéma virtuálního měřicího systému

8.1 Bloky virtuálního měřicího systému

V této podkapitole budou popsány jednotlivé části výše zobrazeného blokového schématu popisující virtuální měřicí systém.

8.1.1 Senzor

Prvním funkčním prvkem virtuálního zařízení je senzor. Tento blok projevuje reakci na podnět - je v přímém kontaktu s měřenou veličinou, kterou následně převádí na unifikovaný signál, který se dále zpracovává. Nejčastěji je měřená veličina v tomto bloku transformována na elektrický napěťový signál. [11]

8.1.2 Obvod pro úpravu signálu

Tato část měřicího řetězce nemusí být vždy nutná, ale ve většině případů je použita. Obvod úpravy signálu se uplatňuje kvůli nevhodnému charakteru výstupního signálu vedeného ze senzoru. Signál může být podle potřeb buď zesílen, nebo zeslaben, upraven pomocí filtrů, které mohou odstranit nežádoucí složky. V této části řetězce může být také použito galvanické oddělení například z důvodu odrušení či bezpečnosti. [11]

8.1.3 A/D převodník

Analogově digitální převodník slouží pro převod analogového napěťového signálu na digitální. Digitální výstup převodníku se používá pro následné zpracování signálu v číslcových obvodech - počítači. [11]

8.2 Aplikace návrhu virtuálního měřicího systému pro detektor s PIN diodou

Tato kapitola konkretizuje předchozí obecný popis měřicího řetězce virtuálního měřicího systému se zaměřením na vyvinutý detektor ionizujícího záření.

Základním prvkem měřicího řetězce je PIN dioda, která zde figuruje jako senzor sledované veličiny. Následují další bloky měřicího řetězce, které jsou zobrazeny na obr. 14 v blokovém schématu.

Vyzařované gama záření vytváří po dopadu na aktivní plochu diody napětový puls, který je dále zpracováván. Jelikož zachycené pulsy PIN diodou jsou charakteristické svým velice nízkým napětím je nutno je zesílit pomocí zesilovače. Takto dostatečně zesílené napětí je zpracováváno analogově-digitálním převodníkem, který je součástí MCU. Dále je tento signál prostřednictvím USB sběrnice předán počítači, ve kterém dochází k závěrečnému zpracování dat a k jejich vizualizaci.



obr. 15 Návrh měřicího řetězce

Takto navržené blokové schéma je dále při realizaci detektoru rozvíjeno o další prvky, které jsou potřebné k jeho fungování. Vlastní realizace detektoru je popsána v následující kapitole.

MCU zajišťují i bezpečnostní funkce ve smyslu šifrování, dešifrování a ověřování dat a také pokročilou ochranu paměti.

Velikost paměti pro ukládání instrukcí (vlastního programu) činí 2048 kB. Velikost paměti pro data se rovná 512 kB. MCU má celkově 144 pinů z toho 53 je možno konfigurovat.

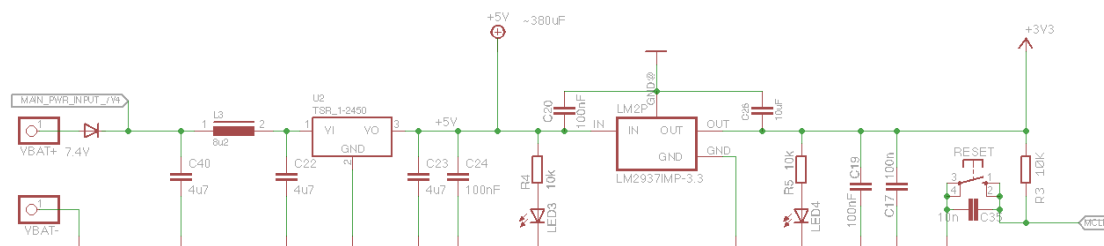
9.2 Napájecí obvod

Hlavní napájení celého zařízení je zajištěno lithiovou baterií o nominální hodnotě 7,4 V. Ihned za napájecími konektory je umístěna sériově dioda, která slouží jako ochrana před přepólováním.

V sérii k baterii a diodě je umístěna odrušovací tlumivka, a to proto, aby mohl být zvolen i jiný zdroj napájení (adaptér), který by mohl způsobovat rušení. Před i za tlumivkou o indukčnosti 8,2 μ H jsou paralelně umístěny filtrační kondenzátory o hodnotě 4,7 μ F. Tato část obvodu odpovídá standardnímu zapojení DC/DC step - down měniče TSR 1-2450 na 5V, které doporučuje výrobce ve svém katalogovém listu. Před výstupem 5V větve jsou k DC/DC měniči paralelně zapojeny blokovací a filtrační kondenzátory. Správné napájení 5V větve je indikované paralelním zapojením led diody a předřadného rezistoru.

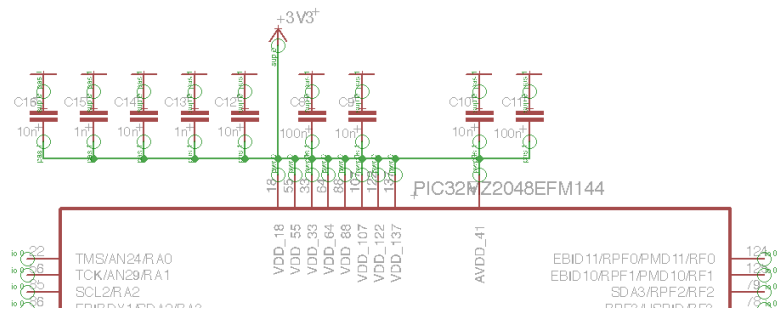
Za 5V stabilizátorem následuje sériově stabilizátor LM2937, který pracuje od 4,75 V do 26 V. Jeho výstupní, stabilizované, napětí je 3,3 V. Součástí stabilizátoru je teplotní ochrana a ochrana proti zkratu na výstupu. Stejně jako v zapojení u DC/DC měniče jsou i zde umístěny paralelně filtrační a blokovací kondenzátory a indikační led dioda s předřadným rezistorem.

K 3,3V napájecí větvi je zapojený MCLR (Master Clear or Reset) pin s inverzní logikou a také tlačítko na reset MCU. Tlačítku RESET předchází pull – up rezistor, který udržuje úroveň napětí odpovídající logické jedničce. Při stisknutí tlačítka dojde k uzemnění MCU a snížení úrovně napětí na takovou hodnotu, která odpovídá logické nule.



obr. 17 Napájecí obvod

Mikrokontrolér je napájen 3,3 V z napájecího obvodu. Frekvence, které mohou způsobovat rušení na výstupu MCU jsou eliminovány blokovacími kondenzátory o hodnotách 1 nF, 10 nF a 100 nF, proto aby nedocházelo k rušení ostatních částí obvodu.



obr. 18 Napájení MCU

9.3 Napájení obvodu PIN diody

Primárním napájením z baterie je přiváděno napětí na DC/DC měnič NCP3063BDR2G. Tento měnič má dva režimy a to buď Step-down, kdy dochází ke snižování napětí a nebo v režimu Step - up, kdy se naopak napětí zvyšuje. Měnič pracuje v rozsahu vstupního napětí 0 až +40 V.

V případě mého návrhu byl použit režim Step-up, který hodnotu přiváděného napětí z baterie zvýší na výstupní napětí 11,5 V. Výstupní napětí je dáno děličem, pro který platí vztah:

$$V_{out} = V_{th} \cdot \left(\frac{R_8}{R_7} + 1 \right) \quad (9)$$

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left(\frac{82 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} + 1 \right) = 11,5 \text{ V}$$

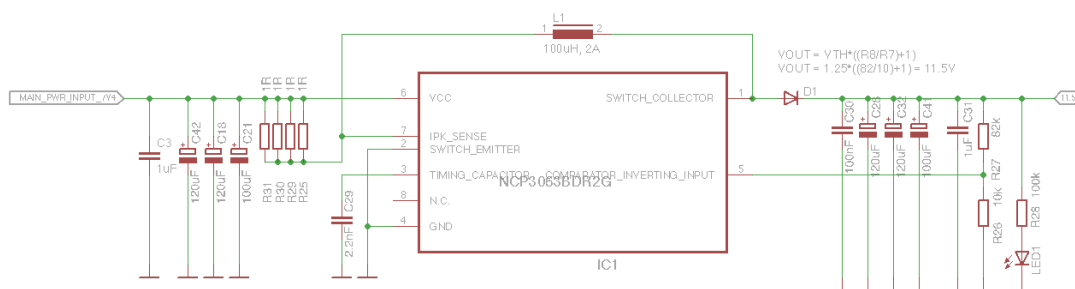
Kde:

V_{out}	výstupní napětí
V_{th}	voltage threshold – napětí na komparátoru uvnitř DC/DC měniče (vyčteno z katalogového listu)
R_8, R_7	hodnoty rezistorů děliče napětí

V zapojení se na vstupu i výstupu nacházejí filtrační a blokovací kondenzátory. Rezistory na vstupu určují proud, který protéká cívkou, Tato cívka se tento proud snaží co nejdéle udržet, a proto dochází ke zvyšování napětí.

Na výstupu měniče je do obvodu zařazena ochranná dioda, která brání zpětnému toku proudu.

Výstup 11,5V větve je indikován led diodou zapojenou s předřadným rezistorem.



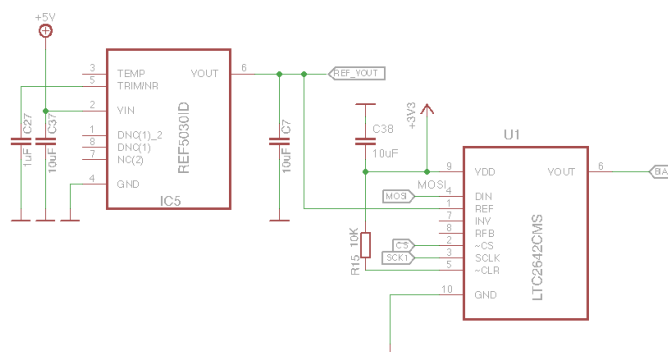
obr. 19 Zapojení step-up měniče

Vyšší napětí pro tento obvod je zvoleno pro potřeby PIN diody a tak, aby nepřevyšovalo mezní hodnotu fungování operačního zesilovače 15 V.

9.4 D/A převodník a napěťová reference

Šestnácti bitový digitálně analogový převodník LTC2642CMS byl použit při nastavování bias⁶ napětí, které je řízeno mikrokontrolérem. Komunikace mezi MCU a D/A převodníkem je realizována sběrnicí SPI ve standardním zapojení. Jedná se o simplexní spojení (MISO vodič není připojen). Bias napětí je poté použito jako offsetové napětí v obvodu s PIN diodou. Zvolený převodník má rozlišení 16 bitů s dobou převodu do 1 µs.

Výstupní referenční napětí reference REF5030ID činí 3 V. Reference pracuje s přesností $\pm 0.05\%$. Hodnota vstupního napětí se může pohybovat od -0,2 V do 18 V. V tomto případě je reference napájena 5V větví.



obr. 20 Zapojení D/A převodníku a reference napětí

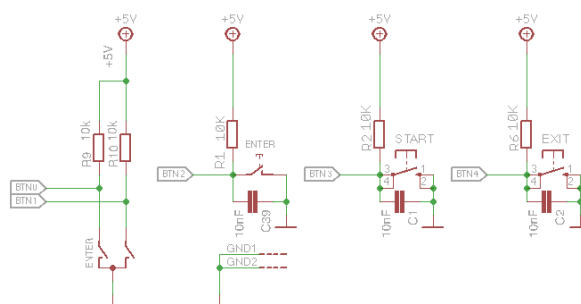
9.5 Zapojení ovládacích prvků

Ovládací panel se skládá ze dvou tlačítek a enkodéru. Všechny tyto prvky jsou zapojeny na MCU přes pull-up rezistor o hodnotě 10 kΩ.

Pro výběr v menu slouží kvadrantní enkodér vybavený zabudovaným tlačítkem. Dva výstupy enkodéru vedoucí na MCU zajišťují schopnost rozeznat směr otočení enkodéru.

⁶ Bias – offsetové napětí

U každého tlačítka je odstranění zákmitů docíleno hardwarově pomocí paralelně zapojeného kondenzátoru.



obr. 21 Zapojení tlačítek a enkodéru

9.6 Displej

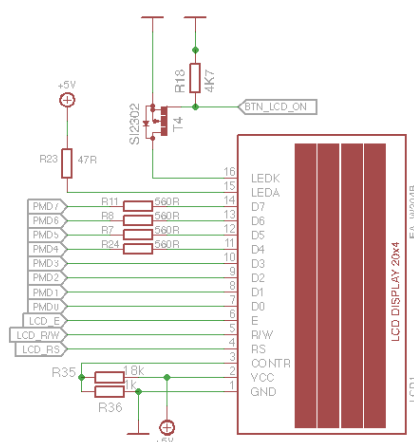
Alfanumerický LCD displej EA W204B-NLW má 20 znaků x 4 řádky. Přenos dat je zajištěn přes paralelní komunikační rozhraní PMP (Paraller Master Port). Displej je zapojen podle standardního zapojení a je napájen z 5V větve.

Na pinu 16 (LEDK), je připojen přes tranzistor typu MOSFET mikrokontrolér, kterým je možno ovládat podsvícení displeje. Pokud je na vstupu logická jednička, je tranzistor propustný a displej je podsvícený, v opačném případě – na vstupu hradla je logická nula, podsvícení je vypnuto. Kontrast displeje je dán děličem odporů R35 a R36. Jeho hodnota činí 0,263 V, které je zvoleno na základě katalogového listu displeje.

$$U_k = U \cdot \frac{R_{36}}{R_{35} + R_{36}}$$

(10)

$$U_k = 5 \cdot \frac{1}{18 + 1} = 0,263 V$$



obr. 22 Zapojení displeje



Čím větší je hodnota kapacity kondenzátoru C_5 , tím je menší úroveň rušení, ale i velikost amplitudy. Naopak nižší hodnota kapacity zajišťuje větší amplitudu, ale tím i způsobuje výraznější rušení.

Druhý operační zesilovač (OZ 2) má za úkol zesílit daný puls. V tomto případě bylo voleno zesílení o hodnotě 100 a je vypočteno podle vzorce:

$$A_U = \frac{R_{16}}{R_{17}} \quad (12)$$

$$A_U = \frac{1 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} = 100$$

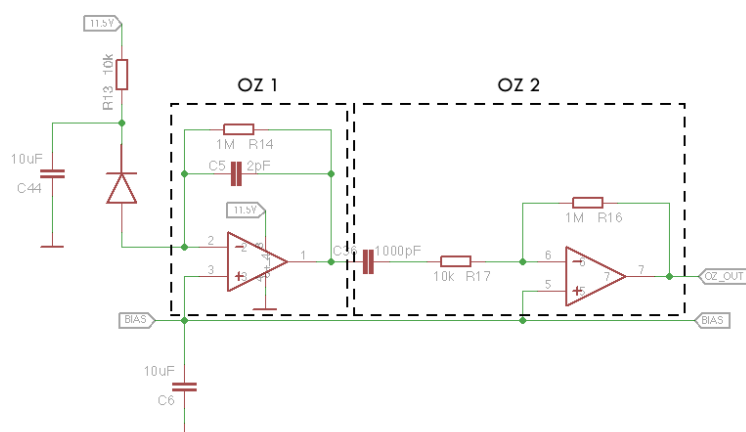
Výsledné napětí je dáno vzorcem č.12, a to za předpokladu, že frekvence f vstupní signálu do OZ 2 je mnohem větší než mezní frekvence signálu. Při takto vysoké frekvenci se kapacita kondenzátoru C_{36} neuplatňuje a operační zesilovač se chová jako v invertujícím zapojení.

$$V_{OUT} = -\frac{R_{14}}{R_{17}} V_{in}, f \gg \frac{1}{2\pi R_{17} C_{36}} \quad (13)$$

Jestliže mezní frekvence výstupního signálu je výrazně menší než vypočtená frekvence, kapacita kondenzátoru C_{36} se projevuje a výstupní napětí je dáno vztahem č. 13.

$$V_{OUT} = -R_{16} C_{36} \frac{d}{dt} V_{in}, f \ll \frac{1}{2\pi R_{17} C_{36}} \quad (14)$$

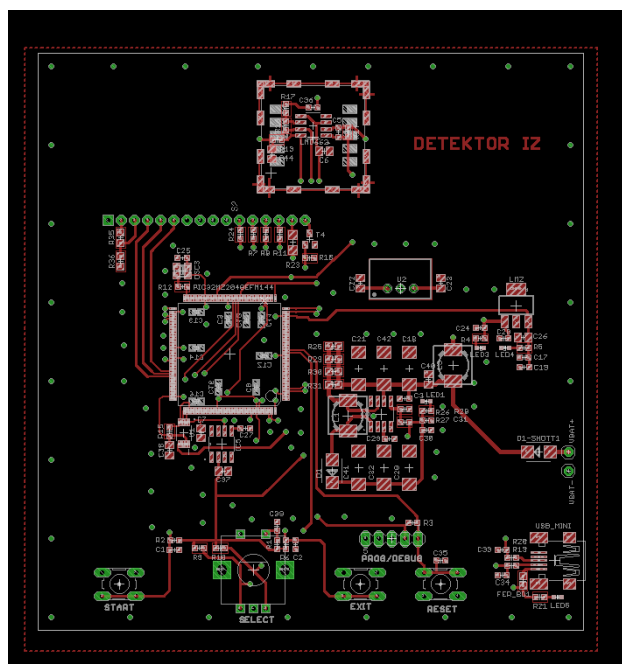
V tomto případě se uplatňuje pouze první vztah, nýbrž frekvence signálu jsou velmi vysoké. [8, 9]



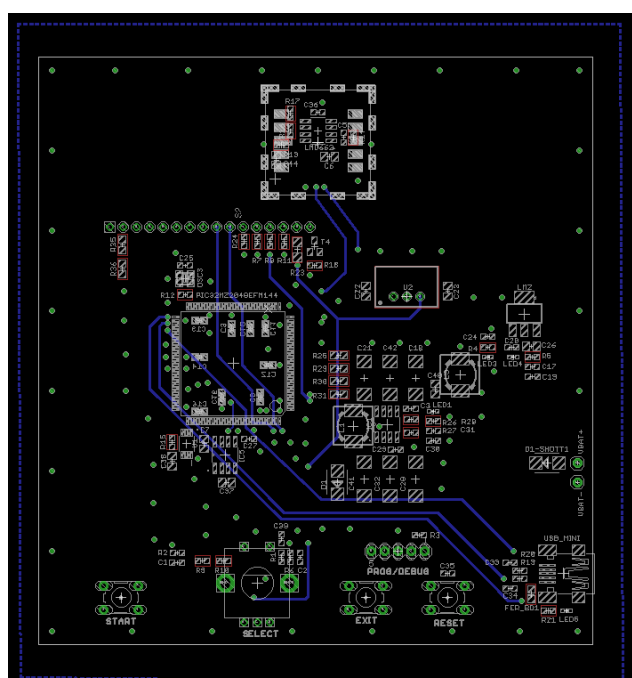
obr. 24 Zapojení obvodu s PIN diodou

10 Výroba a osazení desky plošných spojů

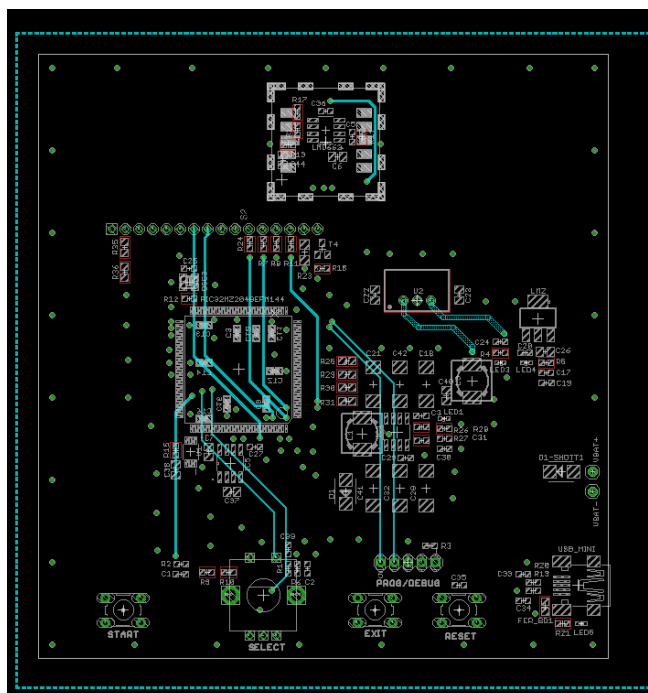
Deska plošných spojů, dále již jen DPS, společně se schématem byla navržena v editoru plošných spojů EAGLE 6.6.0. DPS tvoří celkem 4 vrstvy – TOP, BOTTOM a dvě vrstvy vnitřní. Pro montáž součástky byla zvolena jak technologie THT, tak i SMT.



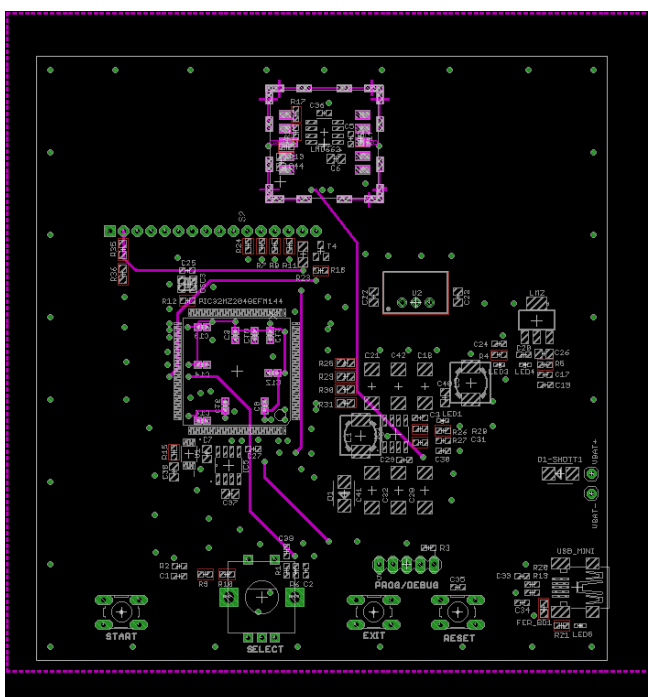
obr. 25 Top vrstva



obr. 26 Druhá vrstva DPS



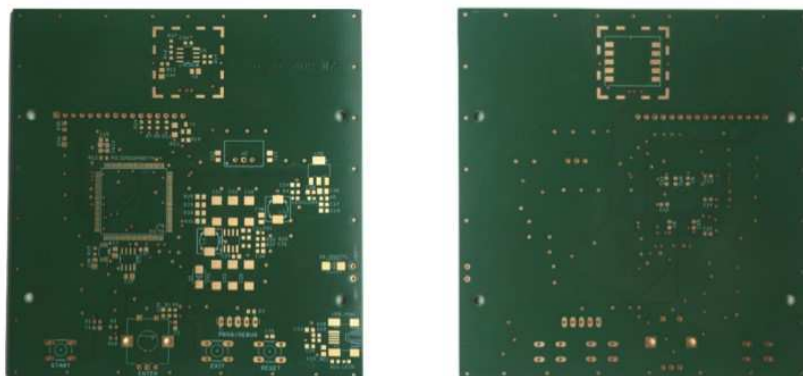
obr. 27 Třetí vrstva



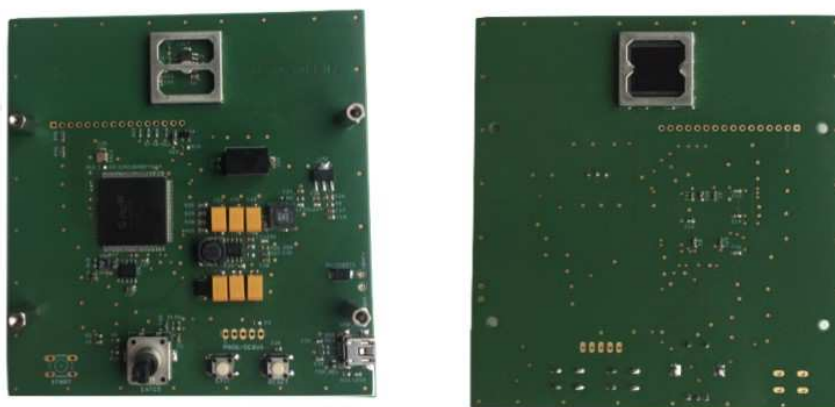
obr. 28 Bottom vrstva

DPS byla vyrobena společností Gatema. Materiál DPS nese označení FR4, což znamená skelný laminát, plátovaný měděnou folií. Teplota skelného přechodu tohoto materiálu je 135°C. Základním materiálem vnitřních i vnějších vodivých vrstev je měď. Vnitřní vrstvy mají šířku vodivých cest 18 μ m, vnější vrstva je galvanicky zesílena na 35 μ m. Na povrchu desky je zelená nepájivá maska a pro pokovení pájecích plošek je použito chemické zlato-nikl.

Na obrázcích níže jsou zaznamenány jednotlivé fáze osazování DPS.



obr. 29 Fáze 1 – neosazená DPS, TOP vrstva – levý obrázek, BOTTOM vrstva – pravý obrázek



obr. 30 Fáze 2 – z části osazená DPS, TOP vrstva – levý obrázek, BOTTOM vrstva – pravý obrázek



obr. 31 Fáze 3 – kompletně osazená DPS, TOP vrstva

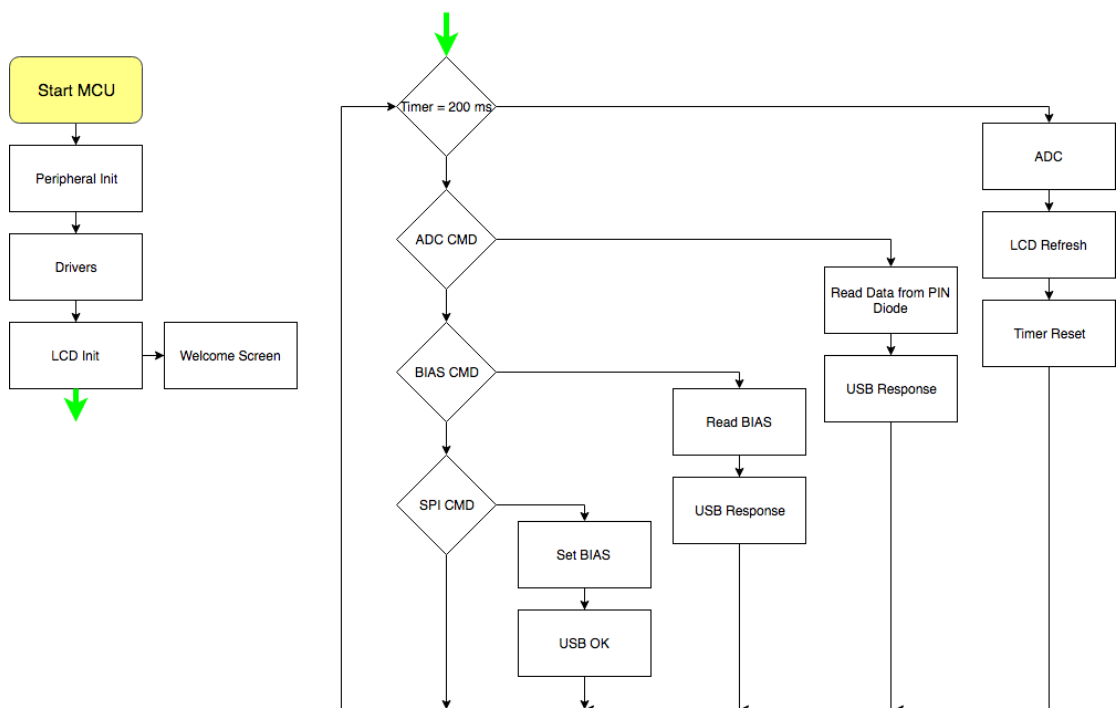
11 Architektura programu pro MCU

Program byl vytvořen v jazyce C ve vývojovém prostředí MPLAB IDE za využití knihoven Harmony společnosti Microchip. [12, 13]

Po startu programu, který je vytvořen pro MCU jsou inicializovány periferie jako SPI, USB, Timery, Hodiny.

Hlavní částí programu je smyčka s 200 ms časovačem (timerem). Jestliže časovač dosáhne 200 ms, vyšle příkaz pro A/D převodník, které vrátí hodnotu s jedním vzorkem napětí z PIN diody a s jedním vzorkem bias napětí. Poté je aktualizován displej s aktuálními hodnotami a časovač je resetován. Pokud časovač není roven 200 ms, čeká na příkazy z USB. V tomto případě může dojít k získání tří typů dat na základě tří rozlišných příkazů. První příkaz umožní vyčtení dat z PIN diody, druhý příkaz vyčte hodnotu bias napětí a pomocí třetího příkazu je možné bias napětí nastavit. Ve všech případech program čeká na odpověď z USB.

Průběh programu je graficky znázorněn vývojovým diagramem na obrázku č. 33.



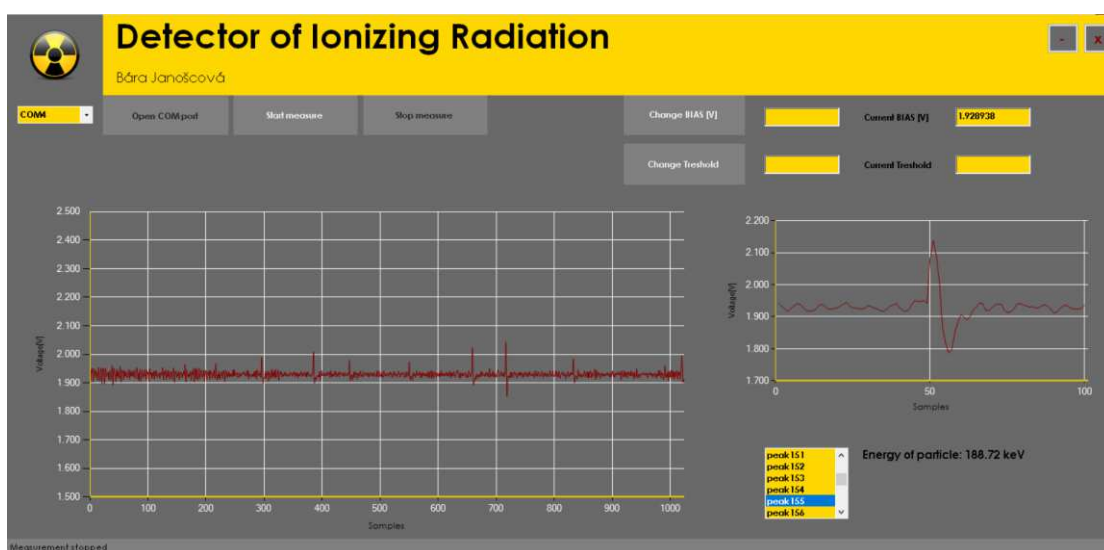
obr. 32 Vývojový diagram

12 SW aplikace pro detektor ionizujícího záření

Aplikace vytvořena k detektoru IZ je jeho nedílnou součástí. Aplikace slouží pro zpracování naměřených dat získaných z PIN diody a jejich vizualizaci.

Pro napsání kódu a vytvoření uživatelského rozhraní byl použito vývojové prostředí Visual Studio 2017 a objektově orientovaný programovací jazyk c# pod platformou .NET Framework.

Na obrázku č. 33 je znázorněné GUI softwarové aplikace.



obr. 33 Uživatelské rozhraní

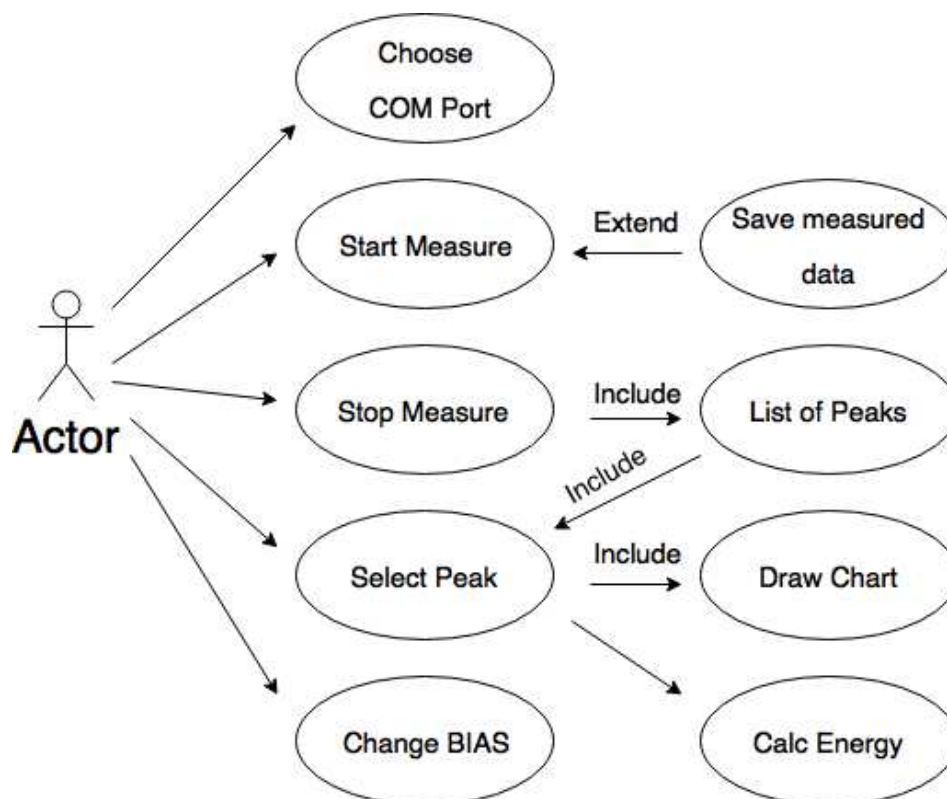
Program je rozdělen do dvou paralelních vláken. První, výchozí vlákno je používáno pro práci s prvky grafického uživatelského rozhraní. Druhé vlákno, které bylo vytvořeno pomocí komponenty BackgroundWorker dále jen BW, slouží pro přijímání dat z USB, k jejich základnímu zpracování a také pro vyhledávání špiček - detektorem zachycených rozpadů částic.

Jak vyplývá z výše uvedeného textu, BW se využívá pro práci s vlákny jako nevizuální komponenta v návrhovém zobrazení formuláře. Tato pomocná třída je deklarována v prostoru jmen (namespace) System.ComponentModel a využívá události DoWork, ProgressChanged a RunWorkerCompleted. Vytvořený kód v události DoWork je vykonáván v druhém vlákně, naopak kód uvnitř události ProgressChanged a RunWorkerCompleted je vykonáván hlavním vlákem a dovoluje tak komunikovat s ovládacími prvky. Předávání dat mezi události DoWork a ProgressChanged probíhá prostřednictvím argumentu typu „object“. Pro spuštění druhého vlákna musí být zavolána metoda RunWorkerAsync.

[10]

Následující obrázek představuje UML – Use Case diagram, tzv. diagram případů užití. Tento obrázek popisuje, jaké jsou možnosti uživatele v prostředí aplikace.

Pro připojení zařízení je nutné, aby si uživatel zvolil daný virtuální COM Port a otevřel ho. Vzápětí je uživateli povolena volba startu měření, kdy po stisku tlačítka dochází k měření a zobrazování dat do grafu a k jejich automatickému ukládání do textového souboru „Data.txt“. Po ukončení měření je vygenerován seznam naměřených špiček - rozpadů. Uživatel má poté možnost si prohlédnout každý zaznamenaný rozpad jednotlivě. Po zvolení daného rozpadu - špičky dojde k jejímu vykreslení v druhém grafu a k zobrazení energie, kterou vybraná špička byla způsobena. Tato energie odpovídá energii zachycené při rozpadu. Uživateli je také dovoleno měnit přednastavenou hodnotu bias napětí a s tím související práh detekce špiček.



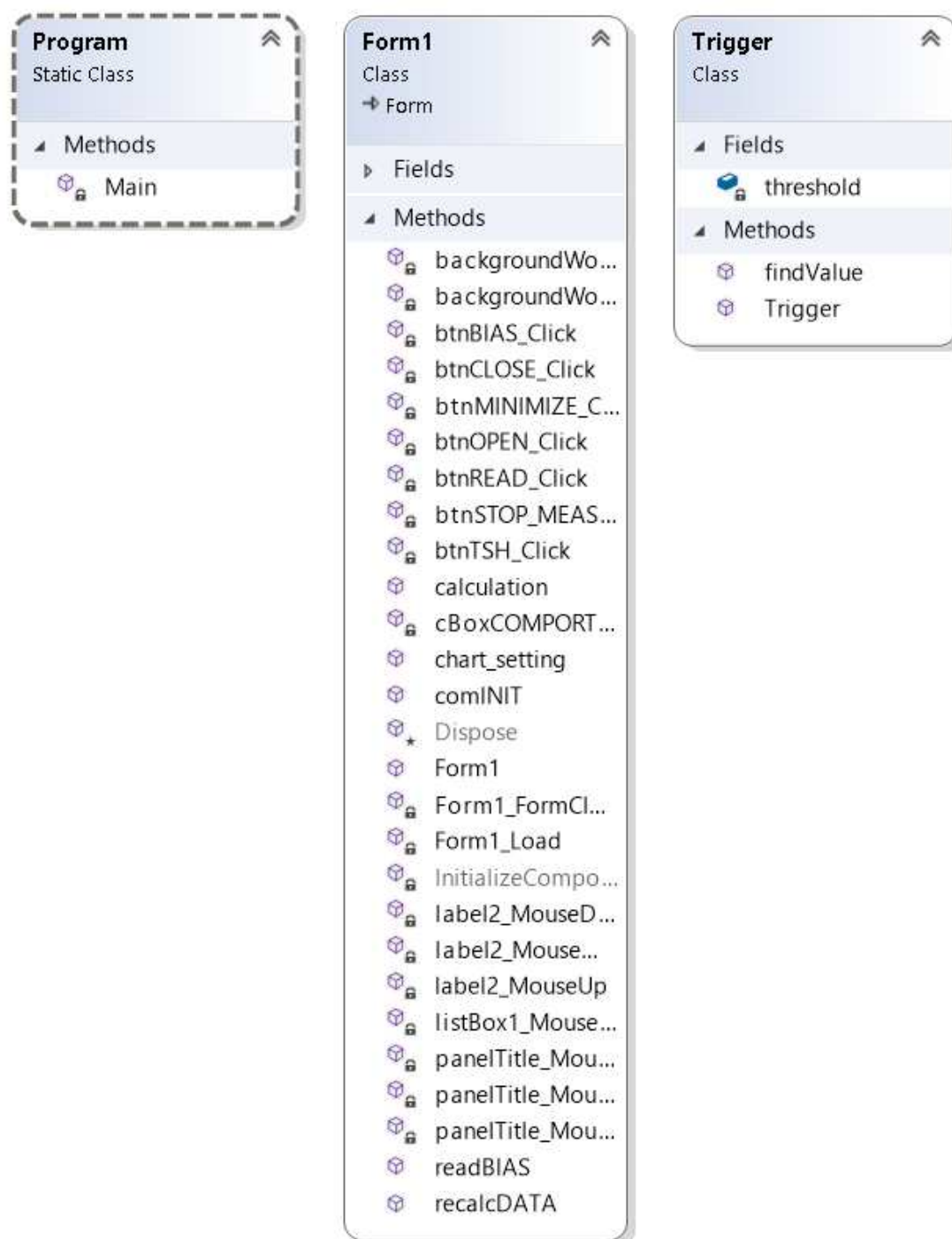
obr. 34 UML – Use case diagram

Softwarovou aplikaci tvoří celkem tři třídy. Statická třída „Program“ obsahuje pouze jednu metodu „Main“. Tato třída je automaticky generována při vytvoření každého projektu a zajišťuje spuštění formuláře Form1.

V třídě Form1 – formuláři, je již hlavní část programu. Formulář obsahuje metody zajišťující použití BW, metody pro přijímání a zpracování dat a také metody pro ovládací prvky uživatelského rozhraní.

Poslední třída nazvaná „Trigger“ slouží pro triggrování naměřených dat a nastavení prahovací hodnoty.

Diagram tříd je zobrazen na obrázku č. 35.



obr. 35 Diagram tříd

13 Měření s vyhodnocením charakteristických dat

Pro to, aby mohlo být realizováno měření, bylo potřeba si obstarat vzorky radioizotopů. S touto záležitostí mi pomohl doc. Dr.RNDr. Petr Alexa z katedry fyziky, který mi pro testování a měření poskytl vzorky a přístup do laboratoře, která se nachází v areálu planetária v Ostravě. Pro měření byly použity celkem tři vzorky radioizotopů.

Tabulka 2 Seznam měřených radioizotopů

Radioizotop	Energie gama záření [keV]
Americium 241	59,54
Cesium 137	661,7
Stroncium 85	514

13.1 Vyhodnocování detekovaných pulsů

Napětí, které je získáno pomocí navrženého detektoru, je stokrát zesíleno a navýšeno o hodnotu bias napětí. Pro výpočet energie detekovaného záření je nutno tyto složky, ulehčující a umožňující detekci, před dalšími výpočty odstranit. Výpočty jsou demonstrovány na jednom zachyceném impulsu o amplitudě 2,05 V. Puls s výpočtem energie je zobrazen na obr. 32.

Výpočet napětí bez offsetového bias napětí a bez zesílení je dán vztahem:

$$U = \frac{U_{det} - U_{BIAS}}{A}$$

$$U = \frac{2,05 - 1,93}{100} = 1,17 \cdot 10^{-3} V \quad (15)$$

kde:

U nezesílené napětí bez bias napětí
 U_{det} softwarem detekované napětí
 A zesílení

Z napětí je možné zjistit náboj Q podle vzorce:

$$Q = U \cdot C$$

$$Q = 1,17 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-12} = 2,35 \cdot 10^{-15} C \quad (16)$$

kde:

Q	náboj v Coulombech
U	nezesílené napětí bez bias napětí
C	hodnota kondenzátoru, který zajišťuje velikost pulsu

Podílem vypočteného náboje Q a elementárního náboje e je získán počet detekovaných částic.

$$N = \frac{Q}{e} \quad (17)$$

$$N = \frac{2,35 \cdot 10^{-15}}{-1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,46 \cdot 10^4$$

kde:

N	počet částic
Q	náboj v Coulombech
e	elementární náboj ($-1,602 \cdot 10^{-19} C$)

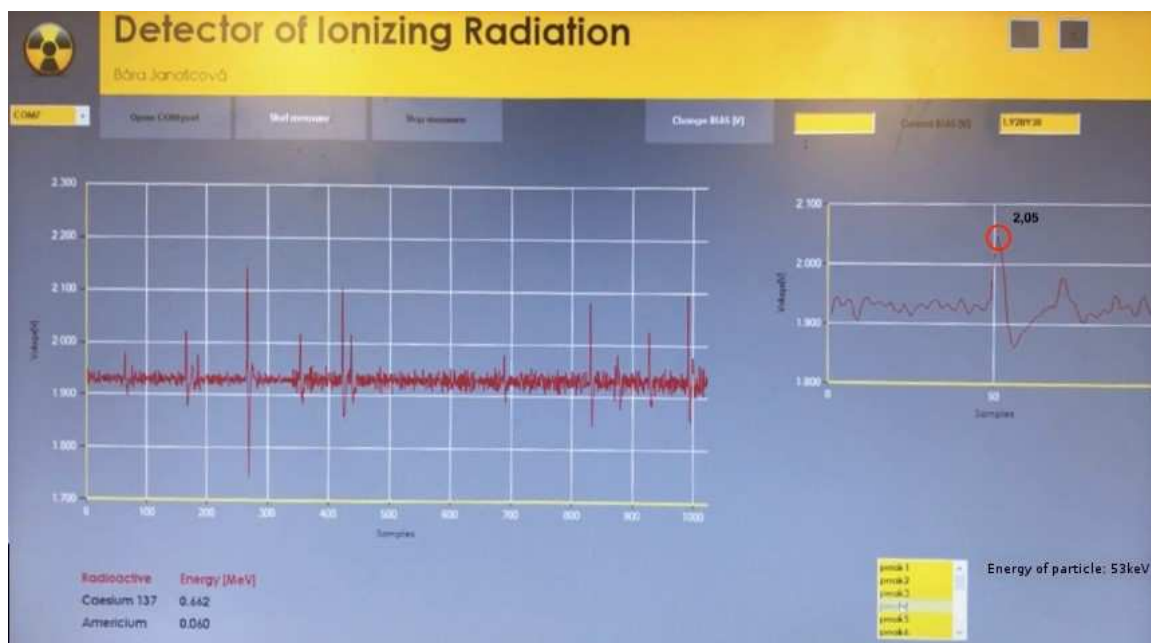
Energie detekovaného záření je pak již jednoduše zjistitelná ze vztahu:

$$E = N \cdot E_{Si} \quad (18)$$

$$E = 1,46 \cdot 10^4 \cdot 3,62 = 52852 \doteq 53 \text{ keV}$$

kde:

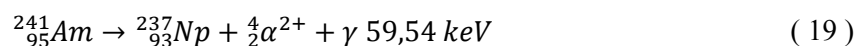
E	energie částice v eV
N	počet částic
E_{Si}	střední energie potřebná pro uvolnění páru elektron-díra v křemíku



obr. 36 Ukázka GUI z průběhu měření

13.2 Výsledky měření

Tabulka č. 3 zaznamenává celkem deset měření Americia 241 a aktivitou 16,79 kBq k datu 25.6.2014. Poločas rozpadu Americia 241 je 432,6 let. Alfa rozpadem se přeměňuje na Neptunium 237 za současného uvolňování gama záření:



Tato měření radioizotopu Americia probíhala ve dvou dnech po pěti měřeních za stejných laboratorních podmínek, tj. při dodržení podmínek opakovatelnosti měření.

Každé měření obsahuje deset detekovaných rozpadů. Dále je v tabulce pro každé měření vypočtený aritmetický průměr z naměřených hodnot energie. V dolní části tabulky je pak vypočten průměr energie rozpadů částic, který je roven 56,27 keV. Při srovnání s hodnotou energie rozpadu částic etalonu, která činí 59,54 keV lze považovat naměřený výsledek realizovaným detektorem ionizujícího záření za odpovídající energii etalonu.

Absolutní chyba měření je vyjádřena vztahem č. 20.

$$\Delta X = |X - X_0| \quad (20)$$

$$\Delta X = |56,27 - 59,54| = 3,27 \, \text{keV}$$

kde:

ΔX	absolutní chyba měření
X	naměřené hodnota
X_0	skutečná hodnota

Pomocí absolutní chyby lze určit chybu relativní, která je vyjádřena v procentech:

$$\delta_r = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100$$

$$\delta_r = \frac{3,27}{59,54} \cdot 100 = 5,49 \%$$
(21)

kde:

δ_r	relativní chyba měření
ΔX	absolutní chyba měření
X_0	skutečná hodnota

13.2.1 Stanovení standardní nejistota měření typu A

V tabulky č. 4 je pro každé měření spočtena standardní nejistota měření typu A, která je způsobena náhodnými vlivy a příčiny jejího vzniku jsou neznámy.

Standardní nejistota měření typu A odpovídá směrodatné odchylce aritmetického průměru \bar{x} a značí se jako $u_A(x)$. Je dána vztahem:

$$u_A(x) = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$
(22)

kde:

$u_A(x)$	standardní nejistota typu A
$\sigma_{\bar{x}}$	směrodatná odchylka
n	počet naměřených hodnot
x	naměřené hodnoty
\bar{x}	aritmetický průměr naměřených hodnot

Tato metoda je založena na statistickém zpracování série naměřených dat. Minimální počet naměřených hodnot je deset – jestliže je počet naměřených hodnot $n < 10$, je potřeba zvýšit vypočtenou standardní nejistotu měření typu A pronásobením s odpovídající hodnotou koeficientu k_s . [11]

Nejistota měření udává rozsah hodnot, které mohou být racionálně přiřazeny k měřené veličině.

13.2.2 Kvantizační chyba A/D převodníku a stanovení standardní nejistoty měření typu B

Tato chyba se vyskytuje vždy při převodu analogového signálu na digitální. Dochází k tomu z důvodu kvantování signálu A/D převodníkem s konečnou chybou rozlišitelnosti.

Rozlišovací schopnost vestavěného, 12 - bitového A/D převodníku ve vybraném MCU se vypočítá pomocí vzorce:

$$RS = \frac{U_{max}}{2^n - 1} \quad (23)$$

$$RS = \frac{3}{4095} = 7,32601 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

kde:

RS	Rozlišovací schopnost
U_{max}	vstupní rozsah ve voltech
n	počet bitů výstupního slova A/D převodníku

Výpočet rozlišovací schopnosti ve voltech by následovně přepočítán na energii:

$$RS_E = \frac{\left(\frac{\frac{RS}{A} \cdot C}{e^-} \right) \cdot E_{Si}}{1000} \quad (24)$$

$$RS_E = \frac{\left(\frac{\frac{7,32601 \cdot 10^{-4}}{100} \cdot 2 \cdot 10^{-12}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \right) \cdot 3,62}{1000} = 0,33109 \text{ keV}$$

kde:

RS_E	Rozlišovací schopnost v keV
RS	Rozlišovací schopnost
A	Zesílení
C	Hodnota kondenzátoru
e^-	Elementární náboj
E_{Si}	Střední energie potřebná pro uvolnění páru elektron-díra v křemíku

V tomto případě nelze rozlišit úroveň menší než $7,32601 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ (0,33109 keV) tzn. všechny změny analogového signálu nižší než je hodnota rozlišovací schopnosti jsou převodem na digitální signál ztraceny.

Pomocí výpočtu rozlišovací schopnosti je nyní možné vypočítat relativní chybu měření způsobenou kvantováním:

$$\delta = \pm \frac{RS}{2} \quad (24)$$

$$\delta = \pm \frac{7,32601 \cdot 10^{-4}}{2} = \pm 3,663 \cdot 10^{-4} V$$

kde:

δ relativní chyba měření způsobená kvantováním
 RS rozlišovací schopnost

Tato relativní se dá rovněž vyjádřit procentuálně a to výpočtem za pomoci vzorce č. 25:

$$\delta_{\%} = \pm \frac{VR}{2^{2^n - 1}} \quad (25)$$

$$\delta_{\%} = \pm \frac{100}{\frac{4095}{2}} = 0,01221 \%$$

kde:

$\delta_{\%}$ Relativní chyba měření způsobena kvantováním vyjádřena procenty
 VR Vstupní rozsah v procentech (100 %)
 n počet bitů výstupního slova A/D převodníku

Relativní chyba způsobena kvantováním je v tomto případě velmi nízká a téměř neovlivňuje měření.

Rozlišovací schopnost A/D převodníku je také použita pro výpočet standardní nejistoty typu B s předpokladem rovnoměrného statistického rozdělení následujícím způsobem:

$$u_B(x) = \frac{RS_E}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

$$u_B(x) = \frac{0,33109}{\sqrt{3}} = 0,1912 \text{ keV}$$

kde:

$u_B(x)$ standardní nejistota měření typu B
 RS_E Rozlišovací schopnost v keV

13.2.3 Stanovení kombinované standardní nejistoty a rozšířené standardní nejistoty

Jestliže jsou známy hodnoty standardní nejistoty měření typu A i B, lze pomocí vzorce č. 27 zjistit hodnotu kombinované standardní nejistoty. Ta uvádí interval, ve kterém se s 68% pravděpodobností vyskytuje správný výsledek. Z tohoto důvodu se aplikuje rozšířená standardní nejistota (vzorec č. 28). Pro koeficient rozšíření 2 normálního rozdělení odpovídá pravděpodobnost pokrytí zhruba 95%. [11]

$$u_C(y) = \sqrt{u_A(x)^2 + u_B(x)^2} \quad (27)$$

kde:

$u_C(y)$	kombinovaná standardní nejistota
$u_A(x)$	standardní nejistota typu A
$u_B(x)$	standardní nejistota typu B

$$U_x = u_C(y) \cdot k \quad (28)$$

kde:

U_x	rozšířená standardní nejistota
$u_C(y)$	kombinovaná standardní nejistota
k	koeficient rozšíření 2

Výsledky těchto nejistot měření jsou zaznamenány v tabulce č. 4.

Tabulka 3 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Americia 241

Radioizotop	Parametry										Průměr - energie [keV]	
	Energie [keV]					Aktivita [kBq]						
Americium 241	59,54					16,79						
Číslo měření	Energie [keV] detekovaná PIN diodou - detekované rozpady											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	51,3	54,79	49,85	50,72	54,46	52,05	68,39	56,47	61,37	58,45		55,78
2	66,4	57,13	56,47	51,72	55,47	61,76	59,45	46,53	56,8	60,77		57,25
3	56,14	56,8	51,17	64,74	51,83	48,19	50,18	58,12	60,44	62,76		56,04
4	57,13	54,15	59,45	56,8	59,45	62,1	61,43	55,47	57,79	58,45		58,22
5	57,13	62,1	58,45	52,16	60,44	60,11	57,46	55,14	59,78	49,85		57,26
6	53,16	53,49	51,17	61,11	59,78	52,49	54,15	60,77	50,18	51,5	54,78	
7	59,12	60,69	57,79	51,5	50,51	52,82	54,15	53,16	58,45	52,82	55,1	
8	51,83	53,16	52,49	50,51	59,12	62,1	53,82	59,78	55,14	51,83	54,98	
9	62,1	52,82	62,76	51,83	58,12	56,8	54,81	60,11	61,1	56,47	57,69	
10	55,14	56,8	53,82	50,51	57,79	56,14	54,15	58,12	54,81	58,45	55,57	
Vyhodnocení	Celkový průměr:										56,27	

Tabulka 4 Nejistoty měření pro data radioizotopu Americia 241

Číslo měření	Standardní nejistota typu A [keV]	Standardní nejistota typu B [keV]	Kombinovaná standardní nejistota [keV]	Rozšířená standardní nejistota [keV]	Výsledek měření (Střední hodnota ± rozšířená nejistota) [keV]
1	1,81	0,19	1,82	3,64	56,27 ± 3,64
2	1,73	0,19	1,74	3,49	56,27 ± 3,49
3	1,77	0,19	1,78	3,56	56,27 ± 3,56
4	0,79	0,19	0,81	1,62	56,27 ± 1,62
5	1,22	0,19	1,24	2,48	56,27 ± 2,48
6	1,32	0,19	1,33	2,66	56,27 ± 2,66
7	1,13	0,19	1,15	2,29	56,27 ± 2,29
8	1,25	0,19	1,27	2,54	56,27 ± 2,54
9	1,21	0,19	1,22	2,45	56,27 ± 2,45
10	0,77	0,19	0,79	1,58	56,27 ± 1,58

Výsledky měření radioizotopu Stroncía 85, jehož aktivita je uvedena k datu 20.4.2018 a Cesia 137, jehož aktivita je uvedena k datu 15.9.2014 jsou zobrazeny v tabulkách č. 4 a č. 5. Tyto naměřené energie neodpovídají hodnotám gama záření etalonu. Je to z toho důvodu, že energie těchto částic je příliš vysoká, aby mohla být absorbována malým objemem senzoru, tento stav může nastat jen velmi ojediněle. Energie, kterou detektor zaznamenal je buď částečná energie částice gama záření, nebo energie fotonů vzniklých zpomalováním (brzdné záření). Zaznamenaná energie se může také rovnat součtu těchto dvou energií.

Tabulka 5 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Stroncium 85

Radioizotop	Parametry									
	Energie [keV]					Aktivita [kBq]				
Stroncium 85	514					926,4				
Číslo měření	Energie [keV] detekovaná PIN diodou - detekované rozpady									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	112,93	69,89	84,46	165,25	68,57	99,03	73,87	83,14	114,26	77,18
2	169,22	72,54	171,21	92,41	76,51	69,89	116,24	89,76	77,18	72,54
3	157,3	82,47	161,94	105,65	71,22	169,22	65,92	69,23	155,31	138,76

Tabulka 6 Vyhodnocení měřeného radioizotopu – Cesium 137

Radioizotop	Parametry									
	Energie [keV]					Aktivita [kBq]				
Cesium 137	661,7					90,04				
Číslo měření	Energie [keV] detekovaná PIN diodou - detekované rozpady									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	73,20	119,56	156,64	70,56	89,10	115,58	140,08	163,92	82,47	116,91
2	126,18	163,71	206,96	103,66	93,73	116,24	100,35	83,15	95,06	126,87
3	75,85	81,15	88,43	68,57	122,21	99,03	117,57	72,54	140,75	73,20

14 Závěr

Hlavní náplní této diplomové práce byl návrh a následná realizace detektoru ionizujícího záření s nízkou úrovní napájecího napětí.

Samotnému návrhu a realizaci přístroje předcházela teoretická část, která byla zaměřena na problematiku jaderné fyziky a fyziky ionizujícího záření. Kapitoly v tomto bloku jsou věnovány popisu známých částic, jejich stavbě, interakcím s ostatními atomy a rozpadům. Podstatná část se zabývá popisem jednotlivých druhů záření a jejich možnou detekcí se zaměřením na gama a rentgenové záření.

Po nezbytném teoretickém rozboru byla práce koncentrována na návrh detektoru. Návrh celého zařízení se odvíjí od měřicího řetězce virtuálního systému. Hlavním prvkem takového systému je osobní počítač či notebook se softwarovou aplikací, jež zajišťuje funkční prvek celého měření. Tento obecný návrh byl rozvinut o vybraný senzor zachycující ionizující záření – PIN diodu X100-7 a mikrokontrolér rodiny PIC32EF za účelem měření a řízení.

Základem realizace detektoru bylo sestavení elektrického obvodu se senzorem v podobě čtyřvrstvé desky plošných spojů. Napájení zařízení je možné duální a to buď baterií nebo ze zdroje – ten byl využit především při ožiování detektoru a při tvorbě SW aplikace. Pro jednotlivé části obvodu je nutná různá úroveň napětí, a pro to byly do obvodu přidány stabilizátory pro snížení této úrovně a měnič, který naopak zvyšuje hodnotu napětí pro napájení diody a operačních zesilovačů. Operační zesilovač byl použitý z důvodu zesílení signálu získaného senzorem, tak aby bylo možné jej zpracovat a vyhodnotit. Analogový zesílený signál je dále předáván mikrokontroléru, jehož součástí, mimo jiné, je i vestavěný A/D převodník, díky kterému je signál převeden do digitální podoby. Komunikace mezi mikrokontrolérem a počítačem byla vyřešena prostřednictvím univerzální sériové sběrnice - USB. Pro zobrazení základních informací, jako je napětí, je k přístroji připojen LCD displej. Kompletní obvod byl testován s využitím multimetru, kdy bylo proměřováno napětí na jeho jednotlivých částech.

Další část práce se zabývala vytvořením programu pro zvolený mikrokontrolér. Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí MPLAB s použitím platformy Harmony. Po nastavení rozvodu hodinového signálu pro jednotlivé periferie byly použity ovladače pro LCD, SPI a USB k vytvoření firmwaru, který reaguje na definované příkazy z počítače. Na základě daného příkazu jsou pak do počítače zasílána příslušná data.

Nejvýznamnější částí práce je softwarová aplikace, ve které dochází ke zpracování dat, k jejich vizualizaci a vyhodnocování. Aplikace byla vytvořena v programovacím jazyce C# pod platformou .NET Framework. Aplikace je dvouvláknová, aby přijímání dat neovlivňovalo práci GUI. Pro snadné ovládání aplikace bylo vytvořené grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje jednoduché posílání příkazu mikrokontroléru skrze tlačítka. V uživatelském prostředí je zahrnutý graf, který zobrazuje měřená data a tím podává uživateli okamžitou informaci o přítomnosti nebo absenci ionizujícího záření v okolním prostředí. Napětíové špičky způsobeny jednotlivými rozpady jsou v aplikaci přepočítány a uživateli poskytují jasný výsledek energie

rozpadu v keV. Uživatelské rozhraní také dovoluje měnit offsetové napětí (bias) a přizpůsobit jej měření. Naměřená data jsou ukládána do textového souboru.

Důležitou částí bylo testování výsledného systému. Nejprve bylo testování provedeno s generátorem pulsů a následně s reálnými radioizotopy. Jelikož radioizotopy nejsou běžně dostupné veřejnosti, byl pro potřeby testování osloven pan docent Petr Alexa z katedry fyziky s žádostí o spolupráci. Díky jeho ochotě a vstřícnosti bylo umožněno testování detektoru v laboratoři jaderné fyziky v areálu planetária Ostrava s etalony radioizotopů Americia 241, Cesia 137 a Stroncium 85. Z výsledků testování vyplývá vhodnost použití detektorů především pro detekci radioizotopů s nižší rozpadovou energií gama záření jako je například Americium 241. Naopak vyšší energie gama rozpadu radioizotopů jako je Cesium 137 a Stroncium 85 již nebyla detekována správně, a to z důvodu malého objemu aktivní části senzoru. Pro získání informace o přesnosti měření Americia 241 byla data vyhodnocena pomocí standardních nejistot měření.

Cíle této závěrečné práce byly ve všech bodech zadání splněny. Případný rozvoj by byl zaměřen na přidání dalších funkcionalit do uživatelského softwaru. Jednalo by se například o vykreslování energetického spektra detekovaných částic nebo měření zachycených částic v časové oblasti. Pokročilejším vylepšením aplikace by mohla být funkce pro rozpoznání radioizotopu podle charakteristických energií rozpadů.

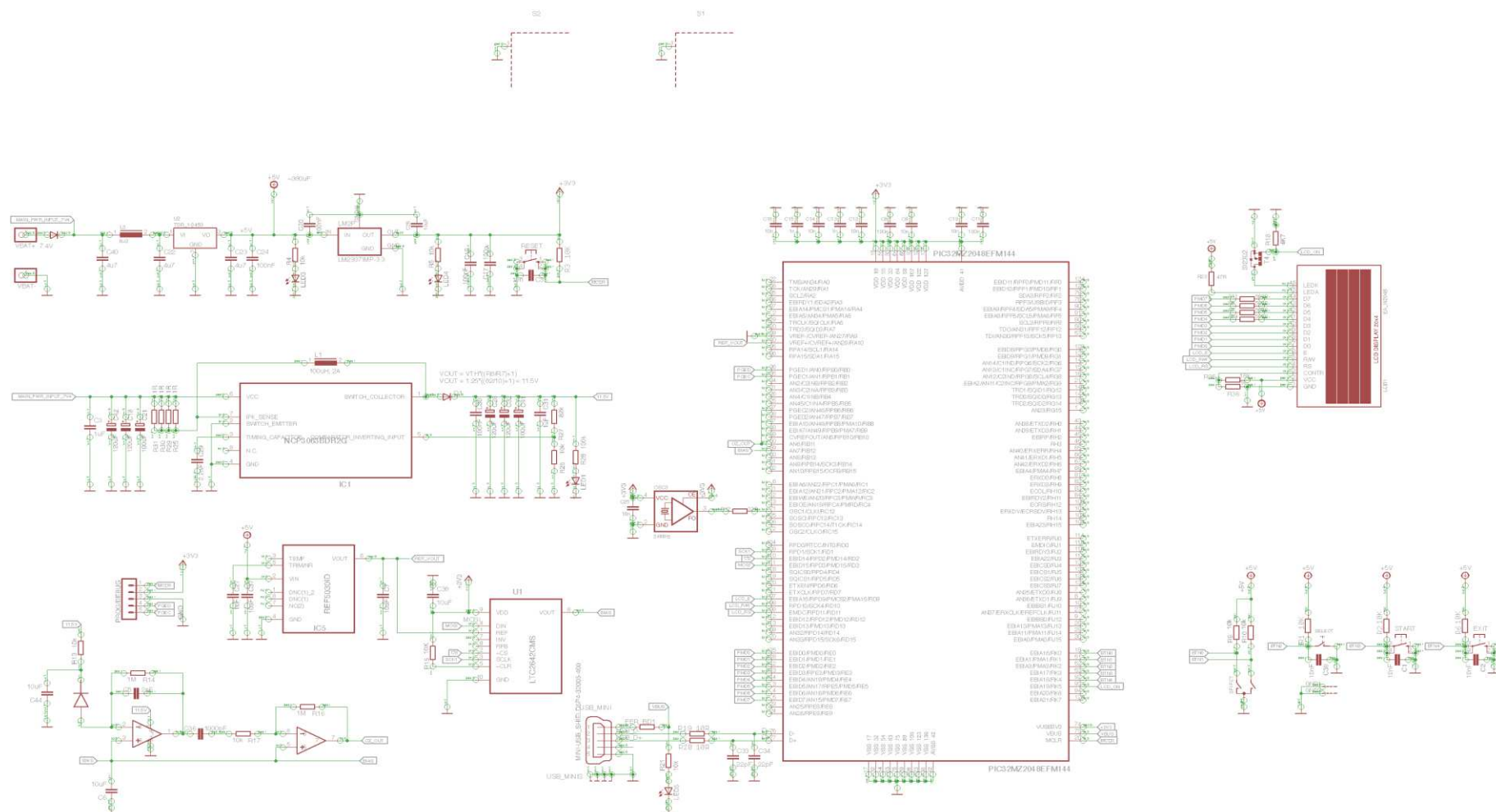
15 Literatura

- [1] *Aldebaran* [online]. Nový lesík 21, 162 00 Praha 6: Aldebaran Group for Astrophysics [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/index.php>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. *Astronuklfyzika* [online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/index.htm>
- [3] *Skupina ČEZ* [online]. Praha 4: ČEZ, c2018 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz>
- [4] CLOSE, F. E. *Částicová fyzika: průvodce pro každého*. Praha: Dokořán, 2008. Průvodce pro každého. ISBN 978-80-7363-160-4.
- [5] *Web radioamatérské stanice OK5TVR: Detekce radioaktivního záření pomocí fotodiody BPW34* [online]. 2013 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.ok5tvr.cz/?p=558>
- [6] KNOLL, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. 4th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2010. ISBN 9780470131480.
- [7] SHAIK, Asif. Physics-and-radio-electronics: Photodiode. *Physics-and-radio-electronics* [online]. Rajampet, Kadapa district, India, c2013-2015 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html>
- [8] Y.ONODERA. *Einstlab: Silicon Gamma Radiation Detector* [online]. c2011-2012 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://einstlab.web.fc2.com/Xdetector/detector.html>
- [9] Y.ONODERA. *Einstlab: Gamma spectroscopy* [online]. 2011 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://einstlab.web.fc2.com/Gamma/spectroscopy.html>
- [10] *Microsoft: C# programming guide* [online]. Microsoft, c2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide>
- [11] ŽÍDEK, Jan. *Měření v informačních a komunikačních technologiích pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra telekomunikační techniky, 2014. ISBN 978-80-248-3561-7.
- [12] *Microchip* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, c1998-2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.microchip.com>
- [13] MPLAB® Integrated Development Environment. *Microchip* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, c1998-2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/mplab/mplab-harmony>

16 Seznam příloh

Příloha č. 1	Schéma detektoru ionizujícího záření	strana I/příloha na CD
Příloha č. 2	Plošný spoj detektoru	strana II/příloha na CD
Příloha č. 3	Firmware pro MCU	příloha na CD
Příloha č. 4	Softwarová aplikace	příloha na CD

Příloha č. 1 - Schéma detektoru ionizujícího záření



Příloha č. 2 - Plošný spoj detektoru

